

Maria Kiiveri

HAPTINEN PALAUTE VIRTUAALITODELLISUUDESSA

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Pro gradu -tutkielma
Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Maria Kiiveri: Haptinen palaute virtuaalitodellisuudessa
Pro gradu -tutkielma, 4 alkusivua ja 77 sivua
Tampereen yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2019

Tässä tutkielmassa perehdyn haptiseen palautteeseen, virtuaalitodellisuuteen, sekä niiden yhdistämiseen. Haptinen palaute tarkoittaa tuntoaistiin liittyvää palautetta, ja se voidaan jakaa karkeasti vielä tuntopalautteeseen, jota havaitaan ihon tuntoaistinsolujen avulla, ja voimapalautteeseen, jota havaitaan lihasten, nivelten ja jänteiden asento- ja liikeaistinsolujen avulla. Työn tutkimusosiossa vertailen kolmea eri vuorovaikutustekniikkaa objektien käsittelyssä ja tarkkuutta vaativassa merkkaustehtävässä virtuaalitodellisuusympäristössä. Vertailtavat vuorovaikutustekniikat perustuvat voimapalautetta tuottavaan Geomagic Touch X -laitteeseen, tuntopalautetta tuottavaan HTC Vive -virtuaalitodellisuusjärjestelmän ohjaimeen, sekä tavalliseen tietokoneen hiireen, joka ei tuota aktiivista haptista palautetta.

Tutkimus suoritettiin lokakuussa 2018 Tampereen yliopiston haptiikkalaboratoriossa. Tutkimukseen osallistui 24 opiskelijaa, joista jokainen suoritti tutkimustehtävät näillä kolmella eri laitteella. Tutkimuksen aikana osallistujien suorituksista kerättiin ohjelmallisesti objektiivista dataa, kuten etäisyyksiä kohdealueiden ja käyttäjän tekemien merkkaukpisteiden välillä. Subjektiivista dataa kerättiin kyselylomakkeiden avulla sekä tutkimuksen aikana että sen lopuksi. Tutkimuksessa löydettiin tilastollisesti merkittäviä eroja tarkkuudessa voimapalautelaitteen eduksi ja nopeudessa virtuaalitodellisuusohjaimen eduksi.

Tulokset ovat lupaavia, ja tutkimuksen ja kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan sanoa, että haptisen palautteen ja virtuaalitodellisuuden yhdistäminen on erittäin mielenkiintoinen ja lupaava ala. Haptiset laitteet vaativat vielä kehitystä tulevaisuudessa, mutta ne tarjoavat jo tällä hetkellä ainutlaatuisia uusia vuorovaikutustapoja virtuaalitodellisuudessa.

Avainsanat: virtuaalitodellisuus, haptikka, haptinen palaute, voimapalaute.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

Sisällys

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Virtuaalitodellisuus | 3 |
| 2.1 | Taustatietoja ja käsitteitä | 3 |
| 2.2 | Virtuaalitodellisuuslaitteita | 5 |
| 2.3 | Virtuaalitodellisuuden käyttökohteita | 8 |
| 2.4 | Virtuaalitodellisuuden hyödyt | 10 |
| 2.5 | Virtuaalitodellisuuden haasteet | 11 |
| 2.6 | Virtuaalitodellisuuden tulevaisuus | 12 |
| 3 | Haptiikka | 15 |
| 3.1 | Ihmisen aistit | 15 |
| 3.2 | Tuntoaisti | 16 |
| 3.3 | Haptinen palaute ihmisen ja koneen vuorovaikutuksessa | 21 |
| 3.4 | Haptisia laitteita | 23 |
| 3.5 | Haptisen palautteen hyödyt | 26 |
| 3.6 | Haptisen palautteen haasteet | 28 |
| 4 | Vuorovaikutus virtuaalitodellisuudessa | 31 |
| 4.1 | Erilaisia vuorovaikutustapoja | 31 |
| 4.2 | Esimerkkitutkimuksia haptisen palautteen hyödyntämisestä | 34 |
| 5 | Haptinen palaute leikkaussuunnittelussa..... | 39 |
| 5.1 | 3D-malli | 40 |
| 5.2 | Unity-kehitysympäristö | 43 |
| 5.3 | Kehitetyt toiminnot | 45 |
| 5.4 | Jatkoideat | 51 |
| 6 | Kokeellinen tutkimus..... | 52 |
| 6.1 | Tutkimusidea | 52 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.2 | Osallistujat käyttäjätestiin | 53 |
| 6.3 | Tutkimuksen kulku | 54 |
| 6.4 | Testiympäristöjen kuvaus ja toiminta | 57 |
| 7 | Tulokset..... | 59 |
| 7.1 | Objektiiviset tulokset kerätystä datasta | 59 |
| 7.2 | Subjektiiiviset tulokset kyselylomakkeesta | 63 |
| 7.3 | Yhteenvedo tutkimuksen tuloksista | 66 |
| 8 | Lopuksi..... | 68 |
| 9 | Viiteluettelo | 70 |

1 Johdanto

Tuntoaisti on yksi ihmisen tärkeimpiä aisteja [Møller 2003]. Saamme sen avulla tietoa sekä oman kehon liikkeistä ja asennoista, että kehoon kohdistuvista monipuolisista ärsykkeistä. Tuntoaistiin kuuluvat ihon mekaaniset aistinsolut eli mekanoreseptorit, jotka aistivat mm. kosketusta, painetta, venymistä ja värinää, sekä lihasten, luuston ja nivelten aistinsolut, eli proprioseptorit, jotka välittävät tietoa kehon ja raajojen asennoista ja liikkeistä. Tuntoaisti on laaja ja monipuolinen kokonaisuus, joka vaikuttaa jokapäiväiseen elämäämme ja vuorovaikutukseen ympäristömme kanssa.

Haptista eli tuntoaistiin liittyvää palautetta on Haywardin *et al.* [2004] mukaan hyödynnetty ihmisen ja tietokoneen välisessä vuorovaikutuksessa vähän. Haptiselle palautteelle on kuitenkin selvä tarve, ja paljon sellaisia sovelluksia, jossa se olisi hyödyksi. Carvalheiro [2016] sanoo haptisen palautteen lisäävän vuorovaikutuksen todenmukaisuutta ja sovelluksen immersiiivisyyttä eli siihen uppoutumista virtuaalitodellisuusympäristössä. Haptiset laitteet itsessään ovat vielä kehittymässä, ja nykyisten laitteiden ongelmia voivat olla mm. laitteiden painavuus, käyttö vain työpöytäympäristössä, tuotetun haptisen palautteen laatu tai rajattu käyttäjän liike. Burdean [1999] mukaan ideaalitilanteessa laitteet olisivat tehokkaita ja kevyitä, sekä käyttökokemus ja palautteen tuntu olisi mahdollisimman luonnollinen.

Käsittelen tässä työssä virtuaalitodellisuutta ja haptista palautetta yleisellä tasolla, mutta painotan silti molempien kohdalla lääketieteen ja terveydenhuollon sovelluksia etenkin esimerkkien osalta. Se on ensinnäkin itseäni kiinnostava ala aiemman bioanalyytikkokoulutustaustani johdosta, ja toisekseen myös idea tämän tutkielman aiheelle syntyi lääketieteeseen liittyvästä projektista. Kyseessä oli Tampereen yliopiston Co-Creation -projekti nimeltä Digital and Physical Immersion in Radiology and Surgery, jossa työskentelin kesän 2018. Projektin aikana kehittämäni haptiikkaa hyödyntävä virtuaalitodellisuussimulaatio esitetään luvussa 5.

Tämän tutkielman tarkoitus on perehtyä kirjallisuuskatsauksella sekä virtuaalitodellisuuteen että haptisen palautteen hyödyntämiseen, ja aiempiin tutkimuksiin näiden yhdistämiseen liittyen. Työn varsinaisen tutkimusosion tarkoitus on vertailla kahden erilaisen haptista palautetta tuottavan laitteen sekä yleisesti käytössä olevan tavallisen hiiren hyötyjä ja haasteita kolmiulotteisen objektin käsittelyssä sekä tarkkuutta vaativassa merkkaustehtävässä virtuaalitodellisuudessa. Tutkimuksessa käytetyt laitteet olivat voimapalautelaite Geomagic Touch X sekä tuntopalautetta tuottava HTC Vive -VR-järjestelmän ohjain.

Merkkaustehtävä valittiin, koska sen avulla voitiin analysoida vuorovaikutustekniikoiden tarkkuutta, ja koska anatomisten pisteiden merkkaukset on keskeinen tehtävä myös oikeassa lääketieteellisessä leikkaussuunnittelussa.

Työn tutkimukseen osallistui yhteensä 24 henkilöä, joista kukin suoritti yhteensä 72 merkkausta, eli 24 merkkausta per laite. Tutkimuksen aikana kerättiin objektiivista tietoa osallistujien suorituksesta suoraan ohjelmallisesti, ja subjektiivisia mielipiteitä kerättiin kyselylomakkeella tutkimuksen aikana sekä sen jälkeen. Tutkimustuloksien analysointi osoitti, että voimapalautteesta on hyötyä tarkkuutta vaativassa merkkauksessa, mutta itse laitteen käyttöön liittyi muutamia ongelmia. Laitteen työtila on ensinnäkin rajattu, ja sen käyttö saattoi väsyttää käyttäjän kättä objektin käsittelyssä. Virtuaaliohjaimen värinäpalautteesta ei ollut samanlaista hyötyä, ja tarkkuus sen avulla olikin huonompi. Sen käyttö oli kuitenkin huomattavasti helpompaa, mutta sekin saattoi väsyttää käyttäjän kättä. Hiiri ei tämän tutkimuksen mukaan sopinut kolmiulotteisten objektien käsittelyyn kovinkaan hyvin, sillä merkkaustarkkuus oli keskimääräisesti huono ja myös objektin käsittely vei kauan aikaa. Tutkimuksen perusteella haptisesta palautteesta voi oikeanlaiseen sovellukseen yhdistettynä olla hyötyä, ja tätä tukevat myös kirjallisuuskatsauksessa esiin nostetut artikkelit. Kalliin hinnan lisäksi haptisissa laitteissa on vielä silti joitain ongelmia, joten laajalti yleistykseen ne vaativat vielä kehitystä.

Tämän tutkielman toisessa luvussa käsitellään virtuaalitodellisuutta sekä sen käyttökohteita. Kolmannessa luvussa perehdytään tuntoaistiin, haptiseen palautteeseen sekä siihen liittyviin hyötyihin että haasteisiin. Neljännessä luvussa käsitellään vuorovaikutusta virtuaalitodellisuudessa, sekä esitellään esimerkkisovelluksia haptisen palautteen hyödyntämisestä. Viidennessä luvussa esitellään radiologeille suunnattu haptiikkaa hyödyntävä virtuaalitodellisuus-simulaatio, jonka toisena pääkehittäjän toimin. Kuudennessa luvussa käsitellään tutkimuskysymystä ja sen taustoja, sekä tutkimuksen kulkua ja tutkimusympäristöjä. Seitsemännessä luvussa tarkastellaan ja analysoidaan tutkimuksen tulokset. Kahdeksas luku lopettaa tämän tutkielman pohdintaan ja johtopäätöksiin.

2 Virtuaalitodellisuus

2.1 Taustatietoja ja käsitteitä

Virtuaalitodellisuuden (virtual reality, VR) konsepti on lähtöisin 1960-luvun puolivälistä, kun Ivan Sutherland kuvaili virtuaalitodellisuutta ikkunaksi, jonka kautta käyttäjä havaitsee virtuaalisen maailman kuin näkisi, kuulisi sekä tuntisi sen oikeana maailmana, sekä voisi itse toimia siellä realistisesti [Sutherland 1965]. Tämän jälkeen virtuaalitodellisuutta ja sen ominaisuuksia on selitetty monella tapaa, ja esimerkiksi Cruz-Neiran [1993] mukaan virtuaalitodellisuus viittaa "immersiiviseen, interaktiiviseen, moniaistiseen, käyttäjäkeskeiseen tietokoneen muodostamaan kolmiulotteiseen ympäristöön". Cipresso *et al.* [2018] ovat havainneet, että yhteistä monille virtuaalitodellisuuden kuvauksille on sen kolme keskeistä ominaisuutta: ympäristössä läsnäolon tunne, ympäristöön uppoutuminen sekä vuorovaikutus ympäristön kanssa.

Vatasen [2016] käytännönläheisen määritelmän mukaan virtuaalitodellisuus on oikeaa maailmaa kuvaava tai täysin kuvitteellinen digitaalisesti luotu keino-tekoinen ympäristö, jota käyttäjä katsoo *virtuaalilasien* (headset) kautta. Virtuaalitodellisuus viittaa itse asiassa monipuoliseen erilaisten sisältötyyppien joukkoon, jotka vaihtelevat erikoiskameroilla ennalta kuvatuista 360-asteen videoista täysin interaktiivisiin virtuaalisiin maailmoihin [Sutherland *et al.* 2018]. Tässä työssä keskitytään interaktiivisiin virtuaalitodellisuussovelluksiin.

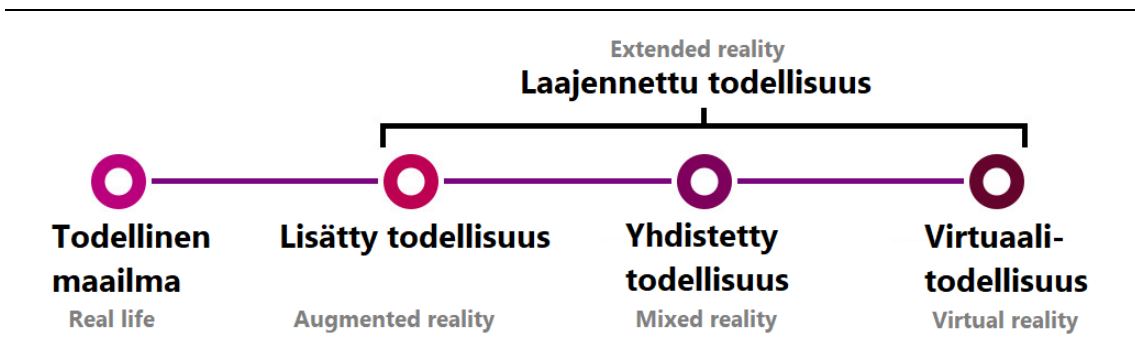
Täydellinen ja ideaalinen virtuaaliympäristö hyödyntäisi kaikkia ihmisen viittä aistia, eli näkö-, kuulo-, haju-, maku- sekä kosketusaistia. Todellisuudessa useimmiten hyödynnetään vain näkö- ja kuuloaistia, eikä juuri koskaan hajutai makuaistia. Kosketusaistia hyödynnetään toistaiseksi melko harvoin, mutta se on yleistymässä. Slater ja Sanchez-Vives [2016] sanovat, että pelkän näköaistin hyödyntäminen on monissa sovelluksissa aivan riittävää, sillä se on hyvin vahva aisti. VR-lasien kautta videota katsova ihminen voi todella tuntea olevansa esimerkiksi vuoristoradassa, vaikka kaikki muut aistihavainnot kertoisivatkin, että hän seisoo edelleen tukevasti maan pinnalla.

Interaktiivisen virtuaalitodellisuusympäristön luomiseksi on määritelty kaksi minimikomponenttia: käyttäjän pään sijainnin sekä asennon seuranta, sekä virtuaalisten esineiden esitys oikeassa suhteessa käyttäjään [Sutherland *et al.* 2018]. Näin virtuaaliobjekteille luodaan yksilöllinen avaruudellinen sijainti kolmiulotteisessa ympäristössä. Vatanen [2016] jakaa sijainninseurannan kolmiulotteisessa tilassa kahteen päätyyppiin, joista ensimmäinen on 3 vapausasteen (3 degrees of freedom, 3DOF) eli pään kiertoliikkeiden seuranta, joka voi-

daan saavuttaa esimerkiksi pelkän kännykän gyroskoopin ja kiihtyvyysanturin avulla. Sitä käytetäänkin lähinnä 360-asteen videoita katsellessa, jolloin käyttäjä pystyy käytännössä vain katselemaan ympärillensä. Täyden 6 vapausasteen (6 degrees of freedom, 6DOF) eli pään sijainnin sekä kierron seuranta vaatii esimerkiksi konenäön, infrapuna- tai laserpohjaisten sensorien, eli käytännössä kalliimman ja tähän tehtävään suunnitellun VR-järjestelmän käyttämistä. Kuiden vapausasteen seurantaa käytetään interaktiivisissa virtuaalitodellisuussovelluksissa ja -peleissä, jolloin käyttäjä voi sekä liikkua vapaasti että katsella ympärillensä.

Joskus virtuaalitodellisuus sekoitetaan läheiseen termiin *lisätty todellisuus* (augmented reality, AR), mutta nämä ovat kaksi eri asiaa. Sutherlandin *et al.* [2018] määritelmän mukaan virtuaalitodellisuudessa käyttäjä näkee ainoastaan virtuaalielementtejä, kun taas lisätyssä todellisuudessa digitaalista informaatiota tai elementtejä sijoitetaan todellisen maailman ”päälle.” Virtuaalitodellisuuslasit siis sulkevat käyttäjän oikean maailman ulkopuolelle, mutta lisätyn todellisuuden lasit ovat läpikatseltavia joko kameroiden tai niiden läpinäkyvän materiaalin (lasin tai muovin) ansiosta. Lisätyn todellisuuden elementtejä voidaan näyttää myös esimerkiksi kännykän ruudulla (kuten esimerkiksi hittipeli Pokemon Go:ssa). Yhdistäviä tuntomerkkejä näille kahdelle ovat sijainninseuranta, jonka avulla käyttäjälle näytetään reaaliaikaisesti kuvaa oikeasta perspektiivistä, sekä moniaistinen vuorovaikutus virtuaaliobjektien kanssa.

Virtuaalitodellisuuden ja lisätyn todellisuuden suhde toisiinsa ja todelliseen maailmaan esitetään kuvassa 1. Kuvan termi *yhdistetty todellisuus* (Mixed reality) tarkoittaa digitaalisen ja todellisen maailman yhdistämistä, ja *laajennettu todellisuus* (Extended reality, XR) taas on uusin kattotermi kaikille todellisuuden eri muodoille, joka kattaa niin lisätyn, yhdistetyn kuin virtuaalitodellisuudenkin [Simpson 2018]. Tässä Pro gradu -tutkielmassa keskitytään vain virtuaalitodellisuuteen ja sen sovelluksiin.



Kuva 1. Todellisuudesta virtuaalitodellisuuteen [muokattu Simpson 2018].

Virtuaalitodellisuuden kolmiulotteisuus, luonnollinen syvyysvaikutelma, sekä korkealaatuinen visuaalinen kokemus johtaa parhaassa tapauksessa käyttäjän kokemaan vahvaan syventymisen ja todellisuuden tunteeseen [Vatanen 2016]. McMahanin [2003] mukaan ilmiöstä käytetään nimitystä *immersio*, ja se kuvaa kokemukseen tai esimerkiksi peliin uppoamista, ja monesti siitä nauttimista niin syvällisesti, ettei käyttäjä välttämättä enää tiedosta ulkopuolista maailmaa. Immersio käsitetään pääsääntöisesti positiiviseksi kokemukseksi. Immersion saavuttamiseen liittyy kolme perusehtoa, mutta kokemuksen syntyminen on silti yksilöllistä, eikä ehtojen täytyminen välttämättä takaa immersiiivistä kokemusta. Ensimmäinen ehto on, että käyttäjän odotusten ja käsitysten virtuaaliympäristöstä on melko tarkasti täytyttävä; toinen ehto on, että käyttäjän toiminnoilla on oltava merkityksellisiä vaikutuksia virtuaaliympäristöön; ja kolmantena, virtuaaliympäristön toimintaperiaatteiden on oltava johdonmukaisia, vaikka ne eivät välttämättä vastaisikaan todellista maailmaa.

2.2 Virtuaalitodellisuuslaitteita

Virtuaalitodellisuusympäristö voidaan luoda monella tapaa, kuten heijastamalla näkymä huoneen jokaiselle seinälle, mutta tässä työssä laitteista käsitellään tarkemmin ainoastaan erilaisia virtuaalitodellisuuslaseja. Virtuaalitodellisuuslasit esittävät virtuaalista ympäristöä käyttäjälle joko yhden tai kahden silmiä lähellä olevan näytön kautta, ja niiden tarkoitus on vallata mahdollisimman suuri osa käyttäjän näkökentästä [Smith 2015].

Virtuaalitodellisuuslasit voidaan jakaa kahteen kategoriaan: kännykän avulla toimiviin edullisiin malleihin ja kalliimpiin oman näyttöpaneelin sisältäviin malleihin [Vatanen 2016]. Halvin vaihtoehto lienee n. 5-10 euroa maksavat Googlen Cardboard-lasit, joka on vain pahvista ja kahdesta linssistä valmistettu katselukotelo, eikä itse asiassa sisällä mitään tekniikka (esitetty kuvassa 2). Kolmiulotteinen vaikutus syntyy, kun Cardboardin kanssa yhteensopiva sovelus jakaa puhelimen näytön kahteen osaan (esimerkiksi Youtuben mobiilisovelluksessa on tämä toiminto) ja silmille heijastetaan näkymät hieman eri kuvakulmista. Pänkäläisen [2016] mukaan tällaiset halvimman luokan virtuaalitodellisuuslasit soveltuvat parhaiten 360-videoiden katseluun.



Kuva 2. Googlen Cardboard-lasit [muokattu Google 2018].

Keskihintaiset kännykkään yhdistettävät lasit eroavat halvimmista malleista valmistusmateriaalin ja kuvanlaadun perusteella, ja kokemus on jo aavistuksen laadukkaampi [Pänkäläinen 2016]. Joissain keskihintaluokan malleissa, esimerkiksi Samsungin Gear VR:ssä (n. 150e, esitetty kuvassa 3) on mukana myös VR-ohjaimet. Laseja käytetään silti kännykän kanssa, joten pelien tulee olla huomattavasti kevyempiä ja yksinkertaisempia verrattuna tietokoneen ja laadukkaampien lasien kanssa pelattaviin peleihin ja simulaatioihin. Gear VR -laseissa ei myöskään ole sijainninseurainta, jolloin käyttäjä ei voi oikeita askelia ottamalla liikkua virtuaalitodellisuudessa. Tämän hintaluokan lasit ovat Pänkäläisen [2017a] mukaan edelleen vahvimmillaan 360-videoiden ja muun median katselussa, ja langattomuutensa ja hintalaatusuhteensa vuoksi ne ovatkin siihen tarkoitukseen hyvin suosittuja.



Kuva 3. Samsungin Gear VR -lasit ja ohjain [Nafarrete 2016 & Samsung 2018].

Kaksi ensimmäistä kuluttajille tarkoitettua laajasti saatavilla olevaa kalolimman luokan VR-järjestelmää olivat HTC Vive sekä Oculus Rift [Sutherland *et al.* 2018]. Niiden perusversioiden hinnat vaihtelevat 500-700 euron välillä

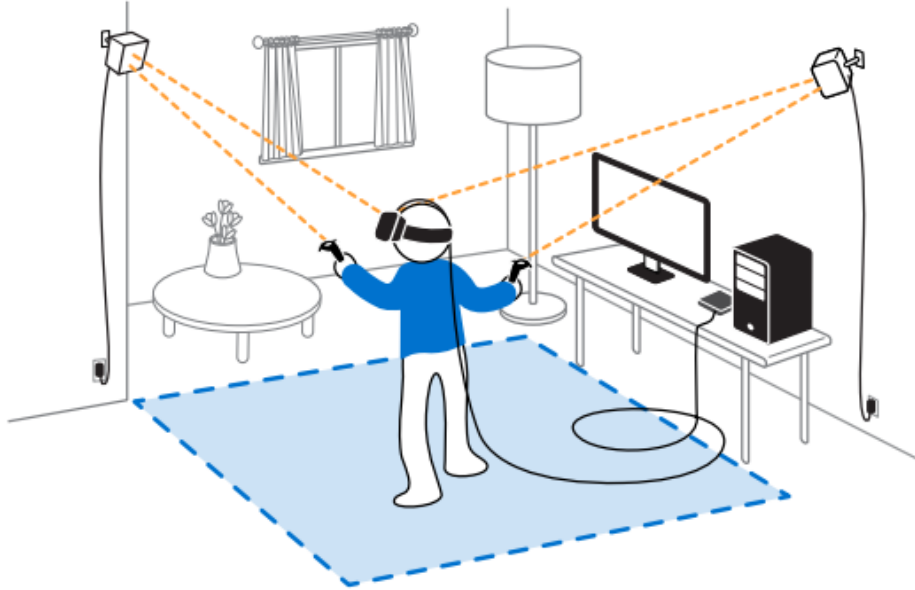
[Gigantti 2018a & 2018b], mutta ne maksavat lisävarusteiden kanssa jopa tuplasti enemmän. Tämän Pro gradu -tutkielman tutkimusosiossa käytettiin HTC Vive -virtuaalitodellisuusjärjestelmää (kuvassa 4), joka esitellään seuraavaksi.

HTC:n ja Valve Corporationin kehittämään HTC Vive -järjestelmään kuuluu *virtuaalilasit*, jonka kautta käyttäjä näkee virtuaalimaailman, kaksi käsissä pidettävää *ohjainta* (controller), joiden avulla käyttäjä voi olla vuorovaikutuksessa virtuaalimaailman objektien kanssa, sekä kaksi käyttäjän ympärille jalustalle tai seinille sijoitettavaa laserpohjaista *sensoria* (basestation), jotka seuraavat VR-lasien ja -ohjainten liikkeitä mahdollistaen virtuaalitodellisuudessa liikkumisen ja objektien kanssa vuorovaikuttamisen [HTC Corporation 2018].



Kuva 4. HTC Vive -VR-järjestelmän pääkomponentit: virtuaalitodellisuuslasit, 2 ohjainta sekä 2 sensoria [HTC Corporation 2018].

Lasien resoluutio on yhteensä 2160×1200 pikseliä (1080×1200 pikseliä per silmä), virkistystaajuus 90Hz ja näkymän laajuus 110 astetta. Järjestelmän avulla käyttäjä voi vapaasti liikkua n. $4,5 \times 4,5$ m kokoisella alueella. [HTC Corporation 2018] Esimerkki järjestelmän käyttötilanteesta ja tilan koosta annetaan kuvassa 5. Laseihin on sisäänrakennettuna yli 70 erilaista sensoria, kuten gyroskooppi, kiihtyvyysanturi sekä laserpaikannussensori [Kelion 2015]. Lasien kautta saatavan visuaalisen palautteen lisäksi käyttäjä voi saada informaatiota virtuaalimaailmasta myös ohjainten kautta; ohjaimissa on sisäänrakennettuna ominaisuutena myös monista muista pelikonsoliohjaimista tuttu haptinen värinäpalaute [HTC Corporation 2018].



Kuva 5. HTC Vive -VR-järjestelmän käyttötilanne [HTC Corporation 2016].

2.3 Virtuaalitodellisuuden käyttökohteita

Craig *et al.* [2009] jakavat VR-sovellukset karkeasti neljään ryhmään, jotka ovat virtuaalinen prototypointi, visualisointi, harjoittelu sekä viihde. Virtuaalisten prototyyppien tekeminen voi säästää huomattavia määriä sekä rahaa että aikaa, ja prototyypin lähettäminen maapallon toiselle puolelle tiedostona on huomattavasti nopeampaa kuin fyysisen mallin postitus. Prototyypistä voidaan saada myös paljon yksityiskohtaisempi virtuaalisesti kuin oikeassa maailmassa, ja muutosten tekeminen käyttäjä- tai asiantuntija-arvioiden jälkeen on nopeaa.

Seuraava ryhmä, datan visualisointi, sopii artikkelin mukaan virtuaalitodellisuuden kohteeksi erinomaisesti. Virtuaalitodellisuus tarjoaa uusia, todellisessa maailmassa mahdollisesti tapoja esittää dataa. Monesti myös ei-kolmiulotteinen data voidaan hyvin esittää virtuaalinäyttöjen avulla, ja saada tästä myös hyötyjä verrattuna 2D-näyttöjen käyttämiseen. Visualisointia käytetään paljon etenkin tieteellisen datan esittämisessä.

Virtuaalitodellisuuden vanhin esimerkki, eli lentosimulaattorit, kuuluvat kolmanteen ryhmään eli harjoitteluun. Virtuaalitodellisuuden avulla voidaan harjoitella sellaisia asioita tai toimenpiteitä, jotka oikeassa maailmassa ovat epätodennäköisiä, kalliita, tai jopa vaarallisia. Myös käyttäjän suoriutumista tehtävissä voidaan mitata, tallentaa ja analysoida jälkikäteen.

Artikkelin neljäs ryhmä on viihdesovellukset. Nykyinen tietokonepelien trendi on todenmukaiset, pelaajan perspektiivistä kuvatut pelit, jotka sopivat myös hyvin virtuaalitodellisuuteen. Vatasen [2016] mukaan toistaiseksi suurin osa tehdystä VR-sisällöstä on kohtalaisen kevyitä pelejä, ja tämä onkin se alue,

jonka kautta suurin osa kuluttajista on päässyt tutustumaan virtuaalitodellisuuteen.

Muita Craigin *et al.* [2009] artikkelissa erikseen mainittuja tärkeitä sovellusalueita ovat lääketieteelliset, opetustarkoitukseen kehitetyt sekä taiteelliset sovellukset, vaikka periaatteessa kaikki ne voitaisiin myös jaotella joidenkin edellisten neljän ryhmän alaryhmiksi. Esimerkiksi suurin osa lääketieteen sovelluksista liittyy joko datan visualisointiin tai harjoitteluun.

Slater ja Sanchez-Vives [2016] taas jakavat virtuaalitodellisuussovellukset todellisuutta simuloiviin sovelluksiin ja epätodellisuutta tai todellisuudenvastaisia tilanteita simuloiviin sovelluksiin. Ensin mainittuun ryhmään kuuluvat mm. koulutukseen ja matkustamiseen liittyvät sovellukset, ja toiseen ryhmään taas monet viihdesovellukset. Virtuaalitodellisuuden avulla voidaan myös motivoida ihmisiä liikkumaan; tuntuuhan kävelylenkki Kiinan muurilla tai jopa Marsin pinnalla heti melko houkuttelevalta.

Sutherland *et al.* [2018] puolestaan keskittyvät artikkelissaan lääketieteeseen liittyviin VR-sovelluksiin, ja jakavat ne kahteen ryhmään sen perusteella, onko sovellus tarkoitettu lääkärin vai potilaan käytettäväksi. Lääkäreille tarkoitettut sovellukset jaetaan vielä neljään luokkaan, jotka ovat harjoittelu, datan visualisointi, leikkaus- tai toimenpidesuunnittelu sekä toimenpiteen aikainen avustus. Näitä sovelluksia rajoittaa tiukat laatuvaatimukset niin järjestelmän vakaudessa kuin tiedon oikeellisuudessaakin, ja siksi näiden sovellusten markkinoille asti tuominen on melko hidasta, kun uusien sovellusten tehokkuutta verrataan nykyisiin käytössä oleviin ohjelmistoihin. Craig *et al.* [2009] pitävät myös lääketieteellisen yhteisön konservatiivista, epäilevää ja kiireistä luonnetta mahdollisena hidastavana tekijänä uusiin ja tuntemattomiin sovelluksiin tutustumisessa ja niihin luottamisessa. Artikkelissaan Sutherland *et al.* [2018] kuitenkin vahvasti uskovat, että lääkäreille tarkoitettujen sovellusten määrä tulee tulevaisuudessa kasvamaan.

Potilaan käyttöön tarkoitettut sovellukset ovat toistaiseksi olleet useimmiten täysin uudenkaltaisia terapiavälineitä erilaisiin psykologisiin ongelmiin [Sutherland *et al.* 2018]. Botella *et al.* [2017] raportoivat, että parhaita tuloksia on saatu fobioiden, eli vakavien, jopa elämää rajoittavien pelkotilojen hoitamisessa. Pelon kohde voi olla mitä tai mikä tahansa korkeista paikoista hämähäkkeihin tai lentämiseen. Yleensä fobioita hoidetaan altistusterapialla, eli henkilöä aletaan altistamaan pelon kohteelle pikkuhiljaa. Oikeassa elämässä tämän toteutus voi olla potilaasta liian pelottavaa, mutta altistusterapia virtuaalitodellisuudessa (VR exposure therapy, VRET) on helpommin hyväksyttävää, sillä todellista vaaraa ei ole. Joitain pelkotiloja, kuten menneisyyden tai tulevaisuuden tapah-

tumiin liittyviä pelkoja ei olisi välttämättä edes mahdollista hoitaa altistusterapialla todellisessa maailmassa. Virtuaalimaailma on käyttäjän kannalta turvallinen, ja lisäksi hän voi koska tahansa halutessaan lopettaa altistuskokemuksen nopeasti. Sutherland *et al.* [2018] luettelevat artikkelissaan myös muita esimerkkejä potilaille tarkoitetuista sovelluksista, joita ovat lasten kivunlievitykseen, syömishäiriöihin sekä kognitiivisten ja motoristen taitojen uudelleenopetteluun liittyvät sovellukset.

Jo viisi vuotta sitten Pensieri ja Pennacchini [2014] löysivät yli 12 000 tieteellistä julkaisua hakiessaan pelkästään terveydenhoitoon liittyviä virtuaalitodellisuussovelluksia. Virtuaalitodellisuutta voidaan käyttää siis moniin käyttötarkoituksiin, ja lukematon määrä uusia mahdollisia käyttökohteita vielä odottaa keksimistään. Craigin *et al.* [2009] mukaan uusien mahdollisten käyttäjien ja sovelluskehittäjien tulisikin miettiä, tarjoaako virtuaalitodellisuus kyseiseen ongelmaan tai tilanteeseen todella jotain hyötyä, vai tuntuuko se houkuttelevalta vaihtoehdolta vain uutuudenviehätyksensä vuoksi.

2.4 Virtuaalitodellisuuden hyödyt

Virtuaalitodellisuuden on luvattu lyhentävän tuotteiden kehitysvaihetta, säästävän rahaa, auttavan erilaisten asioiden harjoittelussa ja tarjoavan mukaansatempaavaa viihdykettä [Craig *et al.* 2009]. Pääsääntöisesti virtuaalitodellisuus sopii kaikkiin sellaisiin tehtäviin, jossa käsiteltävä ongelma on kolmiulotteinen. Suurimmat hyödyt artikkelin mukaan kuitenkin saadaan sellaisten asioiden simuloinnista, joka ei ole mahdollista oikeassa maailmassa. Rakennusallalla virtuaaliobjektien pinnoilla voidaan näyttää tietoa esimerkiksi kuormituksesta tai lämpötilasta, joka ei normaalisti ole nähtävissä. Muun muassa monet armeijat sekä NASA käyttävät virtuaalitodellisuutta hyväkseen erilaisten tilanteiden harjoitteluissa, kuten sukellusveneen ohjaamisen tai avaruusteleskoopin huollon harjoitteluissa. Autoteollisuudessa uusien mallien prototypointi on siirtymässä fyysisistä malleista virtuaalimalleihin, mikä alentaa kustannuksia sekä lyhentää suunnitteluun ja arviointiin kuluvaan aikaa [Fritschi *et al.* 2008]. Virtuaalitodellisuuden hyötyjä ovat myös sen laaja muokattavuus ja käyttäjän kokemus kontrollin tunne. Näistä jälkimmäinen on Botellan *et al.* [2017] mukaan hyödyksi etenkin psykologisten ongelmien altistushoidoissa.

Johnston *et al.* [2017] listaavat artikkelissaan virtuaalitodellisuuden hyödyiksi sen kyvyn visualisoida tieteellistä dataa ja olla sen kanssa vuorovaikutuksessa. Heidän mukaan tästä hyötyvät etenkin tutkijat, kun dataa voidaan tarkastella uusista perspektiiveistä ja näin ollen jopa löytää uusia yhteyksiä ja suhteita. Artikkelissaan he loivat 3D-mallin oikeasta syöpäsolusta ja asettivat sen virtuaaliseen ympäristöön, jossa käyttäjä pystyi tarkastelemaan ja tutki-

maan solun rakennetta ja toimintaa. Virtuaalisolusimulaation hyötyjä arvioitiin käyttämällä sitä lisäopetusmateriaalina solubiologian kurssilla. Simulaatiota 15 minuuttia kokeilleet opiskelijat pärjäsivät kokeessa paremmin kuin verrokki-ryhmä, joka ei simulaatiota kokeillut ollenkaan. Näiden tulosten perusteella artikkelissa todettiin, että virtuaalitodellisuudella voi olla merkittäviä positiivisia vaikutuksia myös oppimisessa ja asioiden sisäistämisessä.

Våpenstad *et al.* [2013] mainitsevat yhtenä isona hyötynä myös potilasturvallisuuden parantamisen, kun erilaisia lääketieteellisiä toimenpiteitä ja niissä tarvittavia psykomotorisia taitoja voidaan harjoitella jo leikkaussalin ulkopuolella virtuaalitodellisuussimulaattoreissa. Van der Meijdenin ja Schijvenin [2009] mukaan virtuaalitodellisuudesta onkin tullut johtava tekniikka erilaisten tähtystysleikkauksien harjoitteluun ja opettamiseen.

2.5 Virtuaalitodellisuuden haasteet

Johnstonin *et al.* [2017] mukaan virtuaalitodellisuuden realistisuuden käänköpuolena on, että ensimmäisellä käyttökerralla käyttäjä voi kokea aistiensa ylikuormittuvan kaikesta uudesta informaatiosta ja erilaisista vuorovaikutustavoista. Jopa yksinkertaisimpien tehtävien, kuten virtuaalitodellisuudessa liikkumisen opettelu, voi heidän mukaan olla yllättävän vaikeaa monien uusien visuaalisten ärsykkeiden keskellä. Tämän ongelman voi poistaa joko varaamalla harjoitteluun tarpeeksi aikaa, tai luomalla erillisen visuaalisesti yksinkertaisen harjoitteluympäristön, jolloin käyttäjä voi aluksi keskittyä peruskontrollien sisäistämiseen.

Toinen monesti esiin nouseva virtuaalitodellisuuden haaste on käyttäjien kokema pahoinvointi. Viimeisimpien virtuaalilasien ja niiden nopean virkistystaajuuden ja tarkan sijainnin seurannan ansiosta ongelma on vähentynyt, mutta ei poistunut kokonaan. Pahoinvoinnin tunne aiheutuu monesti virtuaalitodellisuudessa liikkumisesta, jolloin näköaistin ja sisäkorvan liikkumisesta viestivän aisti-informaation välille syntyy ristiriita, kun ihminen näkee liikkuvansa vaikkei todellisuudessa niin teekään. "Taikamaton" päällä liukuminen virtuaalitodellisuudessa on koettu erityisen paljon pahoinvointia aiheuttavaksi, kun taas "teleporttaaminen" eli silmänräpäyksessä paikasta toiseen siirtyminen ei yleensä aiheuta vastaavaa huonoa oloa. [Johnston *et al.* 2017] Aisti-informaatioiden ristiriita ei myöskään aiheuta pahaa oloa kaikille ihmisille. Kennedy *et al.* [1993] jaottelevat tilapäiset virtuaalitodellisuuden aiheuttamat oireet kolmeen luokkaan: (1) visuaalisiin oireisiin, kuten rasittuneisiin silmiin, sumeaan näköön ja päänsärkyyn, (2) sekavuuden tunteisiin, kuten huimaukseen ja epätasapainon tunteeseen, sekä (3) pahoinvointiin, kuten oksettavuuden tunteeseen.

Kuluttajille yksi haaste on myös laadukkaampien laitteistojen korkeat hinnat [Craig *et al.* 2009]. Tehtävästä riippuen huonoksi puoleksi voidaan laskea myös se, että VR-lasit peittävät muun maailman näkyvistä kokonaan. Tämä on toisaalta asia, johon koko idea perustuu, ja vaihtoehtona markkinoilla on läpi nähtäviä AR-laseja. Myös kalliimmissa VR-laseissa voi olla erillinen kamera tai kamerat, joiden kautta todellista maailmaa voidaan esittää myös lasien sisäpuolelle. Tällaisia laseja voidaankin käyttää sekä VR- että AR-sovelluksiin. Van Krevelenin ja Poelmanin [2010] mukaan kameran käytön huonoja puolia on oikean maailman esitys todellista huonommassa resoluutiossa, sekä silmien rasittuminen kameran sijainnin ja silmien sijainnin eron vuoksi, ja koska luonnollinen syvyystieto esitetään vain yhdessä tasossa. Syvyysvaikutelman ongelma koskee myös ennalta kuvattuja 360-videoita, ja Pänkäläisen [2017b] mukaan ratkaisuna etenkin niitä koskien on uusi light field -tekniikka, jonka avulla syvyysvaikutelma on huomattavasti luonnollisempi. Light field -tekniikkaa hyödyntävät VR-kamerajärjestelmät taltioivat ympäristöä monessa osassa, jolloin katsoja voi liikuttaa päätään luonnollisesti myös videon "sisällä". Tämä lisää huomattavasti immersion tunnetta, mutta toistaiseksi tällaiset kamerat on tarkoitettu ainoastaan ammattilaiskäyttöön ja maksavat jopa satoja tuhansia euroja. Tulevaisuudessa myös tämä teknologia tulee todennäköisesti halpenemaan, ja voi siten auttaa myös VR-lasien kameran syvyysvaikutelman parantamisessa.

Teknisten haasteiden lisäksi myös sovellusten käyttöönotto voi olla hidasta. Riva [2005] tutki asiaa lääketieteen alalla, ja tunnisti siellä neljä estettä tai ongelmaa, jotka vaikuttavat VR-sovellusten yleistymiseen. Ensimmäinen niistä on standardien puute sekä VR-laitteiden että VR-sovellusten osalta, ja toinen standardisoitujen tutkimusprotokollien puute tiedeyhteisöissä, mikä olisi erityisen tärkeää lääketieteen alalla. Kolmantena esteenä mainitaan tutkimuksien tekemisen ja niitä varten kehitettyjen uusien VR-sovellusten kallis hinta. Neljäs este koskee eettisiä sekä turvallisuuteen ja terveyteen liittyviä ongelmia, kuten pahoinvointia ja muita tilapäisiä oireita, joita potilaiden ja lääkäreiden altistus virtuaalitodellisuudelle voisi aiheuttaa.

2.6 Virtuaalitodellisuuden tulevaisuus

Nykyään monet suuret yhtiöt, kuten Sony, Samsung, HTC sekä Google sijoittavat valtavasti VR:ään ja AR:ään. Markkinoille saapuneet kohtuuhintaiset virtuaalitodellisuuslaitteet, kuten Oculus Rift, HTC Vive sekä Sonyn PlayStation VR houkuttelevat sekä käyttäjiä että tutkijoita. Cipresso *et al.* [2018] havaitsivat, että vielä viisi vuotta sitten suuri osa virtuaalitodellisuuteen liittyvistä tieteellisistä artikkeleista julkaistiin konferenssijulkaisuissa, mutta nykyään arvostetut tie-

teelliset aikakausjulkaisut ovat pääasiallinen kommunikaatioväline. Heidän mukaan myös VR-tutkimukseen osallistuvien maiden lukumäärä on hiljattain kasvanut. Virtuaalitodellisuussovellusten kehittämiseen liittyvien ilmaisten työkalujen saatavuus onkin helpottanut sen hyödyntämistä monien eri tieteenalojen tutkimuksessa.

Frausto-Robledo [2018] raportoi virtuaalitodellisuuden käyttäjäkunnan kasvavan nopeaa vauhtia, ja vain yhdessä vuodessa välillä 2017-2018 määrän ennustettiin melkein kaksinkertaistuvan maailmanlaajuisesti 90 miljoonasta jopa 171 miljoonaan. Vuonna 2015 käyttäjiä oli vain 6,7 miljoonaa. Peliteollisuuden, tekniikan alojen ja terveydenhuollon ennustetaan omaksuvan virtuaalitodellisuussovellukset nopeimmin.

Vuonna 2017 virtuaalitodellisuuden ja lisätyn todellisuuden tuotteiden ja palveluiden markkina-arvo oli 11.4 miljardia dollaria, ja sen ennustettiin kasvavan vähintään 100% jokaisen seuraavan neljän vuoden aikana, ja saavuttavan jopa 215 miljardin dollarin arvon vuoteen 2021 mennessä. Virtuaalitodellisuuteen liittyvä markkina-arvo on suurempi kuin lisätyn todellisuuden arvo aina vuoteen 2018 asti, mutta tämän jälkeen lisätyn todellisuuden arvon ennustetaan kasvavan virtuaalitodellisuutta suuremmaksi. Kanadan, Euroopan ja Yhdysvaltojen osuuksien ennustetaan kasvavan nopeimmin. [IDC 2017] Taulukossa 1 esitetään kuinka VR- ja AR-markkinat muuttuvat Yhdysvalloissa, Euroopassa sekä Aasiassa neljän vuoden aikana.

| Alue | Suurimmat segmentit vuonna 2017 | Suurimmat segmentit vuoteen 2021 mennessä |
|--|--|---|
| Yhdysvallat | Kuluttajien osuus, tehdasteollisuus | Tehdasteollisuus, valti-onjohto, vähittäismyynti, rakennusala, kuljetusala |
| Länsi-Eurooppa | Kuluttajien osuus, tehdasteollisuus | Kuluttajien osuus, tehdasteollisuus, vähittäismyynti |
| Aasia & Tyynenmeren alue (Japani poislue-tuna) | Kuluttajien osuus, vähittäismyynti, koulutus | Kuluttajien osuus, kou-lutus, vähittäismyynti, kuljetusala ja terveydenhuolto |

Taulukko 1. Virtuaali- ja lisätyn todellisuuden markkinat nyt ja tulevaisuudessa [IDC 2017 pohjalta].

Terveysthuollon alalla virtuaalitodellisuusteknologia on lääkärien lisäksi hyödyllistä myös potilaille, sillä sen avulla voi esimerkiksi käydä lääkärin vastaanotolla virtuaalisesti. Terveysthuoltoala on alkanut omaksua virtuaalitodellisuussovelluksia laajasti käyttöönsä, ja siksi myös suurta kasvua on Persistence Market Researchin [2018] mukaan odotettavissa. Terveysthuoltoon ja lääketieteeseen liittyvien VR- ja AR-markkinoiden arvo oli vuonna 2016 n. 568 miljoonaa dollaria [Grand View Research, Inc. 2017]. Vuoteen 2026 mennessä markkinoiden arvon ennustetaan olevan jopa 15 miljardia dollaria. Pohjois-Amerikan ja Euroopan odotetaan pitävän johtoasemansa markkinoilla, mutta tulevaisuudessa Kiinan ja Aasian maiden osuuksien odotetaan kasvavan huomattavasti.

Vaikka monet virtuaalitodellisuussovellukset ovat vielä kehitysvaiheessa, on silti virtuaalitodellisuudella valtava potentiaali lääketieteen alalla. Visualise Creative Ltd:n [2019] raportin mukaan tulevina vuosina virtuaalitodellisuutta tullaan käyttämään yhä enemmän ja enemmän parantamaan nykyisten prosessien tarkkuutta ja tehokkuutta, sekä lisäämään ihmisen kyvykkyyttä niin hoidon tarjoajana kuin potilaanakin. Myös Botella *et al.* [2017] ennustavat artikkelissaan, että tulevina vuosina virtuaalitodellisuuden osuus lääketieteen rutiinitehtävissä tulee merkittävästi kasvamaan.

3 Haptiikka

3.1 Ihmisen aistit

Ihmiset saavat tietoa ympäristön fysikaalisista ja kemiallisista olosuhteista sekä oman kehon sisäisestä tilanteesta *aistien* avulla [Haug *et al.* 1994]. Ihmisen perusaistit ovat näkö-, maku-, haju-, kuulo- sekä tuntoaisti, ja niistä vastaavat *aistinelimet* ovat silmät, kieli, nenä, korvat ja iho. Aistinelimet sisältävät *aistinsoluja*, jotka reagoivat ärsykkeisiin laukaisemalla *hermoimpulsseja*. Hermoimpulssit kulkevat hermostoa pitkin aivoihin, missä aistimukset koetaan. Hermoimpulssit itsessään ovat aina samanlaisia, ja aistimukset riippuvatkin siitä, mihin aivo-kuoren alueelle kyseinen hermorata impulssin vie. Esimerkiksi silmistä tulevat hermoimpulssit päätyvät luonnollisesti näkökuorialueelle, ja ihon kosketusais-tinsoluista tulevat impulssit taas omalle alueelleen.

Aistisolujen solukalvoissa sijaitsevat *aistinreseptorit* eroavat kuitenkin toisistaan. Korvissa, ihossa ja mm. sisäelimissä sijaitsevat mekaaniset reseptorit eli mekanoreseptorit reagoivat ääniin, liikkeisiin, värähdyksiin, lihasten venymiseen, nivelten asentoon ja esimerkiksi koskettamiseen. Nenässä ja kielessä sijaitsevat kemialliset reseptorit reagoivat ympäristön molekyyleihin, silmän valo-reseptorit reagoivat valoärsykkeisiin, ihon termiset reseptorit reagoivat lämpöön ja kylmyyteen ja useimmissa elimistön osissa sijaitsevat kipureseptorit reagoivat elimistöä jollain tapaa vahingoittaviin ärsykkeisiin.

Melkein kaikki aistinelimet reagoivat jo hyvin pieniin ärsykkeisiin, mikä on Møllerin [2003] mukaan ollut tärkeää etenkin aistijärjestelmien evoluution alkuaikoina. Aistien avulla voidaan välttää vaaroja ja toisaalta löytää ravintoa, eli ne ovat oleellisia hengissä pysymisen kannalta. Carpenter *et al.* [2018] havaitsivat kosketusaistin olevan niin hämmästyttävän tarkka, että voimme huomata eron jopa yhden molekyylikerroksen verran eroavissa pinnoissa.

Ihmiset saavat eniten tietoa ympäristöstään näköaistin avulla, ja elimistön kaikista aistinsoluista jopa 70% onkin silmissä [Haug *et al.* 1994]. Ihmisen näkökenttä on noin 180 astetta leveä, mutta molempien reuna-alueiden tarkkuus on huomoinpi kuin keskialueella. Silmien liikkeet voidaan jakaa hitaisiin ja nopeisiin liikkeisiin, joista ensin mainittuja tapahtuu, kun pidetään katse lukittuna liikkuvassa kohteessa, ja toisena mainittuja silloin, kun katseen annetaan pyyhkäistä ympäristöä, ja katse ”hyppii” kohdistuspisteestä toiseen. Ihmiset kokevat näköaistimukset yleensä tosiksi, ovathan he nähneet tilanteen ”omin silmin”. Aivot voivat kuitenkin tulkita näköinformaatiota väärin esimerkiksi optisten harhojen vuoksi, ja myös yksilöstä riippuen monia yksityiskohtia voi jäädä ympäristöstä yksinkertaisesti huomaamatta.

Kuuloaisti taas on tärkein aisti ihmisten välisessä päivittäisessä kanssakäymisessä. Sen merkitys alkaa heti vauvaiästä, sillä se on perustana puheen kehitykselle. Kuulon lopullisesta menetyksestä aiheutuukin tutkimusten mukaan paljon voimakkaampi eristäytyneisyyden tunne kuin näön menetyksestä.

Makuaistin avulla ihminen voi varmistua ravinnon kelvollisuudesta ennen sen nielaisemista. Kaikkein herkästi maistamme karvaat ja kitkerät maut, mikä voi suojata edelleen nykypäivänäkin myrkytyksiltä, sillä esimerkiksi useiden kasvimyrkkyjen maku on karvas. Makuaistiin läheisesti liittyvä hajuaisti sitä vastoin ei ole nykyihmiselle kovinkaan merkittävä, vaikka monet eläimet käyttävätkin sitä niin ruoan kuin parittelukumppaneiden etsintään, maastossa liikkumiseen sekä vihollisten välttämiseen. Tämä ei johdu ihmisen hajuaistin huonoudesta, sillä pystymme kuitenkin erottamaan tuhansia hajuja toisistaan. Nämä tehtävät vain hoidetaan nykyisin pääasiassa muiden mekanismien ja aistien kautta, pääsääntöisesti näkö- ja kuuloaistien avulla. Monet aistit ovat yhteydessä aivokuoren tunne-elämästä vastaavalle alueelle, ja siksi esimerkiksi hajuihin ja makuihin voi liittyä vahvojen tunteiden, kuten mielihyvän kokemista. Jotkut näistä tunteista voivat olla kokemuksen perusteella opittuja, kuten kuvotuksen tunne mahataudin aiheuttanutta ruokaa kohtaan, mutta jotkut, kuten makean mausta pitäminen, näyttäisivät Møllerin [2003] mukaan olevan synnynäisiä. Viidennestä pääaistista, tuntoaistista, kerrotaan seuraavassa kohdassa tarkemmin.

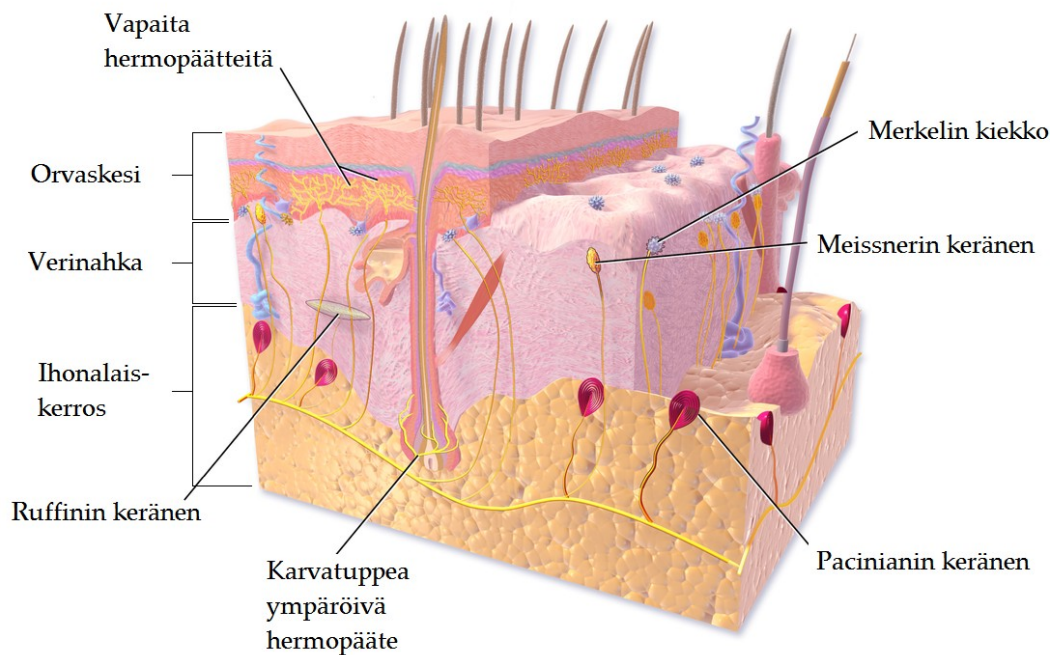
3.2 Tuntoaisti

Sana "haptiikka" on lähtöisin Kreikan kielestä ja tarkoittaa yleisesti kaikkea tuntoaistiin liittyvää [Våpenstad *et al.* 2013]. Hayward *et al.* [2004] määrittelevät tarkemmin, että se tarkoittaa kykyä havainnoida kolmiulotteista oikeaa tai virtuaalista ympäristöä kosketuksen ja tuntoaistin avulla. Goldstein [2010] sanoo, että tuntoaisti onkin yksi ihmisen tärkeimpiä aisteja näkö- ja kuuloaistin rinnalla, ja elämä ilman monipuolisia kosketus- ja kipuaistimuksia olisi huomattavan hankalaa ja vaarallista. Ihmisen ei tällöin huomaisi ympäristön vaaroja, ja saataisi huomaamattaan esimerkiksi nojata kuumaan hellan levyyn tuntematta mitään. Haugin *et al.* [1994] mukaan kipuaisti on eloonjäämisen kannalta ihmisen tärkein aisti.

Tuntoaisti kuuluu ihmiskehon *somatosensorisen järjestelmän* piiriin, joka Møllerin [2003] määritelmän mukaisesti välittää tietoa oman kehon liikkeistä ja asennoista, sekä erilaisista siihen kohdistuvista ärsykkeistä. Tuntoaistin lisäksi somatosensoriseen järjestelmään kuuluu *kipuaisti*, *lämpötila-aisti* sekä *asento- ja liikeaistit*, jotka aistivat kehon ja raajojen asentoja ja liikkeitä [Goldstein 2010]. Näitä aisteja kutsutaan yhdessä *somaattisiksi aisteiksi*.

Tuntoaistiin liittyy keskeisesti iho, ihmiskehon suurin aistinelin [Haug *et al.* 1994]. Aikuisen ihmisen ihon pinta-ala on jopa 1,5-2m². Sen lukuisiin tehtäviin kuuluvat muun muassa elimistön suojaaminen bakteereilta, kemikaaleilta ja muilta vaaratekijöiltä, nestehukan ehkäisy sekä elimistön lämmönsäätelyyn osallistuminen. Ihossa on myös runsaasti erilaisia aistinsoluja, joiden avulla hermostoon välitetään tietoa ihoon kohdistuvista ärsykkeistä.

Iho jaetaan useisiin kerroksiin, jotka on esitetty kuvassa 6. Uloin ohut kerros on nimeltään *orvaskesi* eli epidermis, joka muodostuu pääasiassa keratinisoituneista ihosoluista, eikä siellä ole ollenkaan verisuonia. Sen alapuolella on *verinahka* eli dermis, jossa on paljon sidekudosta, verisuonia ja hermoja. Ihon aistinsolut sijaitsevat pääosin näissä kahdessa kerroksessa. [Goldstein 2010] Verinahan alapuolella on sidekudoksesta ja rasvasta koostuva *ihonalaiskerros*, joka toimii elimistölle hyvänä lämpöeristeenä ja rasvavarastona [Haug *et al.* 1994].



Kuva 6. Ihon kerrokset ja aistinsolut [muokattu Blausen.com Staff 2014 pohjalta].

Kosketuksen, paineen, venymisen ja värinän aistimisesta vastaavat pääasias-
sa ihon hyvin kehittyneet myeliinituppien ympäröimät mekaaniset aistinresep-
torit, eli *mekanoreseptorit* [Møller 2003]. Ne voidaan jakaa neljään luokkaan nii-
den morfologian perusteella. *Meissnerin keräset* (Meissner corpuscles) aistivat
värinää ja kevyttä kosketusta, ja antavat palautetta esimerkiksi puristusotteesta.
Tämän informaation avulla voimme käsitellä objekteja herkästi ja tarkasti niitä
pudottamatta. Meissnerin keräsiä ja seuraavaksi esiteltäviä *Merkelin soluja*

(Merkel cells) esiintyy ihon pintakerroksissa 0,7-0,9mm syvyydessä. Johnsonin [2001] mukaan Merkelin solut aistivat myös kevyttä kosketusta, mutta ovat erityisen herkkiä kulmien, reunojen ja kaarteiden tuntemiselle. Ne ovatkin päävastuussa muotojen ja objektien pintojen aistimisesta. Syvemmällä ihossa noin 1-2mm syvyydessä verinahassa sijaitsee ihon venymistä aistivia *Ruffinin keräsiä* (Ruffini endings) ja kaikista syvimmällä painetta ja tärinää aistivia *Pacinianin keräsiä* (Pacinian corpuscles). Pacinianin keräsien avulla voimme tuntea kaukaisempia tapahtumia työkalua tai muuta väliobjektia pitkin siirtyvien tärinöiden kautta, esimerkiksi hiekan tekstuurin, vaikka käsittelisimme hiekkaa itse asiassa lapiolla emmekä suoraan käsillämme. Johnson [2001] myös tiivistää, että yleisesti vain ”kosketuksena” puhuttuun aistikokemukseen liittyy monenlaisia ärsykyksiä ja useita eri reseptoreja. Jokaisella reseptorilla on oma tehtävänsä, ja tuntoaistimukset muodostuvat näiden reseptoreiden vasteiden summasta. Tuntoaistiin liittyvät mekanoreseptorit on myös esitetty kuvassa 6.

Mekanoreseptoreilla on monia toisistaan poikkeavia ominaisuuksia. Kuten aiemmin todettiin, osa reseptoreista esiintyy ihon pinnassa ja osa syvemmän verinahassa. Joitakin reseptoreita esiintyy vain karvattomalla ja toisia taas vain karvallisella iholla, ja osa reseptoreista mukautuu ärsykyksiin nopeasti, osa hitaasti [Møller 2003]. Mukautuminen tarkoittaa, että koettu aistimus pienenee ajan kuluessa, vaikka ärsyke pysyy samana. Tästä syystä esimerkiksi päällä olevia vaatteita ei tunneta koko aikaa. Hitaasti mukautuvat reseptorit välittävät tietoa jatkuvasta paineesta, ja nopeasti mukautuvat reseptorit kosketuksesta. Viimeisenä luokittelutapana artikkelissa käytetään reseptiivisen alueen, eli yksittäiseen reseptoriin vaikuttavan ihoalueen kokoa. Vallbo ja Johansson [1984] sanovat, että mitä syvemmällä ihossa reseptori sijaitsee, sitä suurempi on sen reseptiivinen alue. Tiivistelmä mekanoreseptoreista ja niiden ominaisuuksista esitetään taulukossa 2.

| | Sijainti iholla | Ihoalueen tyyppi | Mukautu- minen ärsykkeeseen | Resep- tiivinen alue | Vastuu- alue |
|-----------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Meissnerin keränen | Pinnalla | Karvaton | Nopeaa | Pieni | Värinä, kosketus |
| Merkelin solu | Pinnalla | Karvaton | Hidasta | Pieni | Kevyt kosketus |
| Ruffinin keränen | Syvällä | Karvallinen | Hidasta | Suuri | Ihon venyminen |
| Pacinianin keränen | Syvällä | Karvaton, karvallinen | Erittäin nopeaa | Suuri | Paine, tärinä |

Taulukko 2. Ihon mekanoreseptorit [koostettu Møller 2003 ja Johnson 2001 pohjalta].

Mekanoreseptorien lisäksi ihossa on myös rakenteeltaan yksinkertaisempia myeliinitupettomia *vapaita hermopäätteitä* [Møller 2003]. Karvatuppien ympärille kiertyneet vapaat hermopäätteet aistivat herkästi ihokarvojen liikkeitä, mutta niihin kuuluvat myös neljän tyyppiset lämpöreseptorit (lämmölle, viileydelle, kuumuudelle ja kylmyydelle), sekä ihon lisäksi myös nivelissä, jänteissä ja sisäelimissä sijaitsevat kipureseptorit. Viimeksi mainitut reagoivat monenlaisiin sellaisiin ärsykkeisiin, jotka aiheuttavat tai uhkaavat aiheuttaa elimistöön kudosvaurioita. Yleensä myös lämpöreseptorien ääripäät eli kuumuuden (yli 45 °C) ja kylmyyden (alle 15 °C) reseptorit luetaan kipureseptoreihin, sillä ne välittävät kivun tuntemuksia. Haugin *et al.* [1994] mukaan kipureseptorit ovat muutenkin monella tapaa erityisiä, sillä ne eivät esimerkiksi mukaudu ärsykkeisiin ollenkaan, vaan päinvastoin ärsykkeen jatkuessa kipu voimistuu ajan mittaan. Kipu myös aktivoi sympaattista hermostoa, ja voi saada siten sydämen hakkaamaan ja verenpaineen kohoamaan.

Lihasten, luuston ja nivelten aistinsoluja kutsutaan *proprioseptoreiksi*. Ne välittävät tietoa kehon ja raajojen asennoista sekä liikkeiden suunnista ja nopeuksista ilman näköaistin apua, ja mahdollistavat siten liikkumisen myös silmät kiinni. Asentoaistin avulla tiedämme myös, kuinka paljon lihasvoimaa tietyn asennon säilyttäminen tai liikkeen suoritus vaatii. Proprioseptoreista saatavaa tietoa käsitellään aivoissa automaattisesti, eikä aikuisten ihmisten yleensä tarvitse tietoisesti keskittyä käsien tai jalkojen sijaintiin esimerkiksi paikallaan seistessään tai kävellessään. Proprioseptoreita ovat jänteissä sijaitsevat venytykseen reagoivat hermopäätteet nimeltä *Golgin jänne-elimet*, lihaksissa sijaitsevat *lihaskäämit*, jotka välittävät tietoa lihaksien pituuksista sekä pituuden muuttumisnopeuksista, sekä *nivelpussien hermopäätteet*, jotka välittävät tietoa nivelten liik-

keistä ja asennoista. Myös niveliä ympäröivän ihon mekanoreseptorit osallistuvat asento- ja liikeinformaation välittämiseen.

Somatosensorisen järjestelmän tunto-, kipu-, lämpö-, asento- sekä liikeaistit ovat nyt käyty läpi, mutta palataan vielä tarkemmin tuntoaistiin ja kosketukseen. Mitkä ovat esimerkiksi ihmisen motivaatiot koskettamiselle? MacLean [2000] tiivistää, että yleensä kosketamme jotain, jos haluamme suorittaa tehtävän, tutkia esineen tilaa tai ominaisuuksia, kommunikoida tai saada aikaan reaktion. Tarkemmin eriteltynä sen avulla voidaan arvioida esineiden ominaisuuksia (kuten materiaalia ja painoa), varmistua tehtävän onnistumisesta (auton vaihteen loksauttaminen paikoilleen), varmistua tehtävän jatkumisesta (pyörítettävän pippurimyllyn tärinä tai kynän teroittamisen kitka) sekä arvioida ja huomioida toisia ihmisiä (esimerkiksi kättely uuteen ihmiseen tutustuttaessa). Voidaankin todeta, että tuntoaistin perusteella saadaan paljon erilaista tietoa ympäristöstä.

Tuntoaistilla on joitain ainutlaatuisia ominaisuuksia verrattuna muihin aisteihin. Ensinnäkin ihon tuntoaistinsolut ovat levittäytyneet koko kehon pinnalle, toisin kuin muissa aisteissa ja niihin liittyvissä aistielimissä [Møller 2003]. Tiheimmin tuntoaistinsoluja on silti sormenpäissä. Toisekseen tuntoaisti on lähiaisti, ja tuntoaistinsolujen aktivoituminen vaatii suoraa kosketusta [Haug *et al.* 1994]. Tuntoaistin kautta saatu informaatio on siten yksityistä. Myös makuaisti on lähiaisti, mutta muut perusaistit, eli näkö-, kuulo- ja hajuaisti ovat kaukoais-teja, eli ne reagoivat myös kauempana oleviin ärsykkeisiin. Viimeisenä ominaisuutena nostan esille tunteista viestimisen kosketuksen ja kosketusaistin avulla. MacLeanin [2000] mukaan suurin osa ihmisistä ymmärtää ”haptista kieltä”, eli kosketuksen kautta kommunikointia. Se opitaan jo nuoruudessa muiden kielten rinnalla, ja on yleensä intuitiivista, vaivatonta ja sujuvaa.

Monet ihmiset kokevat, että näköaisti on tuntoaistia tärkeämpi, ja pakon edessä mieluummin luopuisivat tuntoaistista. Näköaistin menetystä voi ainakin hetkellisesti simuloida sulkemalla silmät, mutta tuntoaistin menetystä on vaikeampi kuvitella. Robles-De-La-Torre [2006] raportoi kahdesta hyvin tunnetusta potilastapauksesta, jossa potilaat menettivät suuren osan tuntoaistista laajan hermovaurion seurauksena. Toinen potilas menetti aistimukset kaulasta ja toisen suusta alaspäin. Molemmilla potilailla säilyi kyky tahdonalaisten lihasten liikuttamiseen, sekä lämpötilan ja kivun tuntemiseen, mutta tästä seurasi silti vakavia ongelmia. Potilaat eivät enää pystyneet tuntemaan oman kehon tai raajojen sijaintia tai liikkeitä, eikä myöskään esimerkiksi sänkyä, jossa makasivat. Fyysiset tarkat liikkeet olivat etenkin alkuun aivan mahdottomia, mutta vuosien harjoittelulla toinen potilas pystyi seisomaan ja liikkumaan hitaasti pelkän

näköaistin varassa. Kaikki fyysiset toiminnot piti opetella uudelleen, eikä niistä ikinä enää tullut täydellisiä, automaattisia tai nopeita. Toinen potilaista kärsi myös pureskelu- ja puheentuotto-ongelmista. Tuntoaisti on siten kriittinen tekijä jokapäiväisessä elämässä ja vuorovaikutuksessa ympäristömme kanssa. Tuntoaisti on laaja kokonaisuus, joka vaikuttaa arkipäiväisiin, itsestään selviltä tuntuviin toimintoihimme ehkä enemmän kuin äkkiseltään tulemme ajatelleeksi-kaan.

3.3 Haptinen palaute ihmisen ja koneen vuorovaikutuksessa

Suurin osa tietokonekäyttöliittymistä ei varsinaisesti tuota haptista eli tuntoaistiin liittyvää palautetta. Käyttäjä kyllä tuntee esimerkiksi hiiren muodon kädelänsä ja näppäimistön painikkeet sormenpäillään, mutta tässä on kyse esineiden passiivisista haptisista ominaisuuksista, eikä niiden tuottamasta aktiivisesta haptisesta palautteesta [Miller & Zeleznik 1998]. Haywardin *et al.* [2004] mukaan oikeat haptiset käyttöliittymät mahdollistavat ihmisen ja koneen vuorovaikutuksen tuntoaistin kautta, useimmiten käyttäjän liikkeisiin perustuen. Käyttöliittymissä ei kuitenkaan vielä ole hyödynnetty näitä ihmisen perustavanlaatuisia kykyjä ja ominaisuuksia kovinkaan tehokkaasti, vaikka aiemmin esimerkiksi monet työtehtävät vaativat tarkkoja motorisia taitoja, ja se on ihmiselle luontainen informaatiokanava. Vidholmin [2008] mukaan haptisen palautteen avulla on tarkoitus välittää enemmän tietoa datasta, kuin mitä pelkästään visuaalisen esityksen kautta voidaan saada.

Haptinen palaute voidaan jakaa palautetyypin perusteella karkeasti taktiili- eli *tuntopalautteeseen* (tactile feedback), jota havaitaan ihon mekanoreseptorien ja vapaiden hermopääätteiden avulla, sekä kinesteettiseen palautteeseen eli *voimapalautteeseen* (force feedback), jota havaitaan lihasten, nivelten ja jänteiden proprioseptoreiden eli asento- ja liikeaistinsolujen avulla [MacLean 2000]. Näitä kah- ta ei kuitenkaan täysin voi erottaa toisistaan, sillä myös ihon aistinsolut vaikuttavat asentojen ja liikkeiden havaitsemiseen, ja vastaavasti tuntopalautetta aistiessaan ihminen on tietoinen myös esimerkiksi kätensä asennosta. Haptinen havaitseminen sisältää siis laajan skaalan erilaisia tuntemuksia, kuten kosketuk- sen, ihon venymisen, lämpötilan, kosteuden, pintamateriaalien, esineiden muo- tojen sekä raajojen liikkeiden aistimisen.

Srinivasan ja Basdogan [1997] jakavat haptiset käyttöliittymät karkeasti pa- lautetyypin perusteella tunto- ja voimapalautekäyttöliittymiin, tai vaihtoehtoi- sesti käytettävän laitetyypin perusteella joko työpöytämallisten tai päälle puet- tavien laitteiden käyttöliittymiin. Erilaiset ohjaussauvat (*joystick*) ovat esimerkki työpöytämallisista laitteista ja haptiset hanskat esimerkki päälle puettavista lait- teista. Myös näiden yhdistelmiä on tehty. Päälle puettavien laitteiden ongelma-

na voi olla niiden häiritsevä paino, mutta työpöytälaitteet taas rajoittavat käyttäjän liikemahdollisuuksia.

Haptista palautetta hyödyntävän sovelluksen vaatimukset voidaan yksinkertaisesti jakaa seuraaviin vaiheisiin: haptisen laitteen tilan havaitseminen, törmäysten havaitseminen, virtuaaliobjektien tilojen (mm. sijaintien) päivitys ja tarvittavien voimien ilmaiseminen käyttäjälle [Robles-De-La-Torre 2006]. Kaikki nämä vaiheet toistetaan jopa 1000 kertaa sekunnissa aidontuntuisen kokemuksen saavuttamiseksi.

Nykyiset virtuaaliympäristöt ja ylipäätään ihmisen ja tietokoneen välinen vuorovaikutus on toteutettu Robles-De-La-Torren [2006] mukaan pääasiassa näköaistin, ja vähemmässä määrin kuuloaistin varaan. Haptisen palautteen yhdistäminen virtuaalitodellisuuteen luo monia kiinnostavia käyttökohteita ja mahdollisuuksia. Srinivasanin ja Basdoganin [1997] mukaan niitä ovat lääketieteessä leikkausharjoittelusimulaattorit sekä erilaiset avustavat haptiset käyttöliittymät sokeita varten, viihteessä mitä mielikuvituksellisimmat videopelit sekä simulaattorit. Koulutuksessa käyttökohteita ovat erilaisten maapallon ulkopuolisten fysikaalisten tapahtumien simulointi, teollisuudessa haptisten laitteiden yhdistäminen suunnittelu- ja muotoiluohjelmistoihin ja taiteessa erilaisten virtuaalisten taidenäyttelyiden, konserttien ja museoiden ominaisuuksien laajentaminen.

Tähän mennessä useimmat haptisiin käyttöliittymiin liittyvistä tutkimuksista on kohdistettu staattisen tai dynaamisen virtuaaliympäristön suoraan tutkimiseen tai manipulointiin [MacLean 2000]. Tällainen vuorovaikutus matkii suoraan oikeaa käyttötilannetta, kuten leikkausta. Toinen ääripää on abstrakti vuorovaikutus erilaisten oikeassa maailmassa vaikeasti havainnollistettavien ympäristöjen kanssa. Esimerkkinä tästä on vuorovaikutus videontoiston kanssa virtuaalista massaa pyörittämällä, jolloin video kelautuu eteen- tai taaksepäin.

Haptisten käyttöliittymien tulisi aina olla ergonomisia ja mukavia käyttää, sillä kipu tai epämukavuus ylittävät kaikki muut käyttöliittymän aktivoimat tuntemukset [Srinivasan & Basdogan 1997]. Robles-De-La-Torre [2006] sanoo, että haptinen palaute on myös tärkeä integroida tarkasti ja merkityksellisellä tavalla sekä muihin käytettyihin vuorovaikutusteknologioihin, että sovelluksella suoritettavaan tehtävään nähden. Esimerkiksi leikkausharjoittelusovelluksissa visuaalisen ja kosketusinformaation tulee toimia hyvin tarkasti yhteen todennukaisen tuntemuksen saavuttamiseksi, eikä havaittavissa olevaa ajallista tai avaruudellista yhteensopimattomuutta tulisi sallia. Haptisen palautteen käyttöön liittyy paljon vaatimuksia kalliista laitteistosta aina runsaasti suunnit-

telua vaativalle käyttöliittymätasolle asti, mikä osaltaan voi selittää niiden harvinaisuutta.

3.4 Haptisia laitteita

Haptiset laitteet tuottavat tuntoaistin avulla havaittavia tuntemuksia, eli tunto- ja voimapalautteita erilaisten mekanismien avulla [Carvalho 2016]. Hayward *et al.* [2004] määrittelevät, että siinä missä tietokoneen näyttö voi muuttaa graafista sisältöään tietokoneen käskystä, voi haptinen laite muuttaa mekaanisia ominaisuuksiaan, kuten värinän tuottamista tai käyttäjää kohti suunnattuja voimia tietokoneen käskystä, ja näin mahdollistaa tuntoaistin käytön ihmisen ja tietokoneen välisessä vuorovaikutuksessa. Useimpia haptisia laitteita käytetään käsillä, ja siten niiden tuottama palautekin tunnetaan useimmiten joko kämmenissä tai sormissa [Tan *et al.* 1994]. Myös muitakin kehon osia voidaan käyttää, mutta tässä työssä ei käsitellä tällaisia laitteita tarkemmin.

Haptisia laitteita kuvaillaan usein niiden vapausasteiden (Degree of Freedom, DOF) avulla, joka käytännössä tarkoittaa kuinka monessa suunnassa laitetta voidaan liikuttaa, tai kuinka monessa suunnassa se voi tuottaa palautetta käyttäjälle [HapticsHouse.com 2019]. Yksinkertainen haptinen laite, kuten pelikonsoliin yhdistettävä ratti, voi liikkua vain yhdessä kiertosuunnassa (vasen-oikea), eli sillä on yksi vapausaste. Myöhemmin esiteltävät monimutkaisemmat voimapalautelaitteet voivat liikkua kolmiulotteisessa rajatussa koordinaatistossa mihin suuntaan vain, eli niillä on 3 vapausastetta. Jos laitetta pysytetään vielä liikuttamisen lisäksi kiertämään kolmeen eri suuntaan, ja se voi myös tuottaa näiden suuntaisia vääntövoimia, on sillä jo 6 eri vapausastetta. Vapausasteiden lisäksi haptiset laitteet voivat erota toisistaan maksimaalisen voimantuoton, työtilan koon, käytettyjen ohjelmistojen, hinnan sekä monien muiden tekijöiden osalta [Saad *et al.* 2018].

Haptiset laitteet voidaan jakaa tunto- ja voimapalautelaitteisiin [Våpenstad *et al.* 2013]. Tuntopalautelaitteet simuloivat sellaisia tuntemuksia, jotka havainnoidaan ihon mekanoreseptoreiden avulla. Ne voivat olla monenlaisia värinä-, lämpötila-, lipsahdus- tai esimerkiksi painetuntemuksia, tai objektien pintojen tekstuureja ja muotoja. Tässä työssä keskitytään vain värinäpalautelaitteisiin. Carvalheiron [2016] mukaan useimmissa tuntopalautelaitteissa on sähköinen moottori (actuator), mutta jotkut laitteet käyttävät myös hydraulikkaa tai paineilmaa palautteen tuottamiseen. Erilaisia tuntopalautetta tuottavia laitteita esitetään kuvassa 7.



Kuva 7. Tuntopalautetta tuottavia laitteita. Vasemmalta oikealle kännykkä, aktiivisuusranneke, PlayStation-ohjain, sekä tuntopalautepuku Teslasuit [Huawei Technologies Co., Ltd. 2019; Fitbit, Inc. 2019; Sony Interactive Entertainment Europe Limited 2019; Teslasuit 2018].

Voimapalautelaitteiden tuottamat tuntemukset havaitaan lihasten, luiden ja nivelten proprioseptoreilla, eli asento- ja liikeaistinsoluilla [Våpenstad *et al.* 2013]. Niiden kautta saadaan tietoa raajojen sijainnista, liikkeestä sekä niihin vaikuttavista voimista. Voimapalautelaitteilla simuloitavia asioita voivat olla objektien kovuus, paino sekä liikkuvuus. Artikkelissaan Tan *et al.* [1994] jakavat voimapalautelaitteiden toiminnan kahteen alueeseen; ensinnäkin ne mittaavat käyttäjän käden (eli käytännössä itse laitteen) sijaintia ja liikkeitä kolmiulotteisessa tilassa, ja toisekseen tuottavat vastaavasti voimapalautetta (esimerkiksi objektiin koskemisesta) takaisin käyttäjälle. Oakleyn *et al.* [2000] määritelmän mukaan voimapalautelaitteet toimivat siis yhtä aikaa sekä informaation syöttölaitteina (käyttäjä ohjaa tietokonetta) että palautelaitteina (tietokone antaa palautetta käyttäjälle). Erilaisia voimapalautetta tuottavia laitteita esitetään kuvassa 8.



Kuva 8. Voimapalautetta tuottavia laitteita. Vasemmalta oikealle yhden vapausasteen ratti, kahden vapausasteen voimapalautehiiri, kuuden vapausasteen Phantom Premium -voimapalautelaite, sekä voimapalautehanskat [Thrustmaster 2019; Microsoft Corporation 2019; 3D Systems, Inc. 2019a; HaptX Inc. 2018].

Haptinen palaute on ollut osa virtuaalitodellisuutta koskevaa tutkimusta jo kohtalaisen pitkään, mutta ensimmäiset kuluttajille suunnatut laitteet tulivat markkinoille vasta 1990-luvun loppupuolella, ja ne oli kehitetty tietokonepelejä

varten [Cummings 2007]. Ensimmäinen niistä oli Nintendo 64:n ohjaimeen kehitetty haptista värinäpalautetta tuottava lisäosa nimeltään "Rumble Pak", joka tarisutti ohjainta pelin tapahtumiin perustuen. Myöhemmin tämä tekniikka on integroitu suoraan ohjaimiin, kuten PlayStationin DualShock-ohjaimissa (kuvassa 7), eikä erillisiä lisäosia enää tarvita. Nykyään värinäpalaute löytyy jo melkeinpä kaikista matkapuhelimista ja esimerkiksi aktiivisuusrannekkeista.

Tässä työssä myöhemmin käytettävät ja siten oleelliset haptiset laitteet ovat värinäpalautetta tuottava VR-ohjain, sekä voimapalautetta tuottava Geomagic Touch X-laite. VR-ohjain on esitelty jo aiemmassa kappaleessa HTC Vive -järjestelmän yhteydessä, joten seuraavaksi perehdytään tarkemmin vain Touch X:ään.

Geomagic-tuoteperheeseen kuuluva Touch X (kuvassa 9, aiemmin nimeltään Sensable Phantom Desktop) on työpöytämallinen voimapalautelaite, jonka avulla käyttäjä voi tuntea ja manipuloida virtuaalisia 3D-objekteja ja niiden pintamateriaaleja yhden kosketuspisteen avulla. Laitteessa on kuusi vapausastetta (sijainti ja kierto) käyttäjän liikkeille, ja 3 vapausastetta (sijainti) voimapalautteen tuottamiselle [3D Systems, Inc. 2019b]. Laitetta pidetään kädessä kuin kynää.

Tällaisen voimapalautelaitteen ja sopivan virtuaaliympäristön avulla käyttäjä voi liikuttaa kohdistinta (eli "hiirtä") kolmiulotteisessa tilassa, ja nähdä näytöltä kun kohdistin koskee virtuaalista objektia [HapticsHouse.com 2019]. Tällöin laitteen moottorit kytkeytyvät päälle, ja käyttäjä tuntee koskevansa objektin pintaa. Mikään ei kuitenkaan oikeasti koske laitteen kärkeä, vaan moottorit pysäyttävät liikkeen siihen, missä virtuaaliobjektin pinta oikeasti olisi. Moottoreiden toimintaa ohjataan monimutkaisilla algoritmeilla, ja niiden avulla voidaan määritellä muun muassa tuntuuko objektin pinta sileältä, nihkeältä, vai kenties karhealta, ja kuinka pehmeä, kova tai painava objekti on.

Touch X:n *työtila* (workspace) on kooltaan 16 (leveys) x 12 (korkeus) x 12 (syvyys) senttimetriä, ja se pystyy tuottamaan 7,9 Newtonin voiman, joka vastaa n. 0,8 kilogrammaa [3D Systems, Inc. 2019b]. Tarpeeksi suurella voimalla laitteen voi siis pakottaa virtuaaliseen läpi, mutta tällainen ei tietenkään tee hyvää laitteen sisältämälle tekniikalle. Geomagic Touch X on hyvin tarkka, kestävä ja helppokäyttöinen laite. Se sopii hyvin 3D-mallinnukseen ja -muotoiluun sekä tutkijoiden käyttöön eri tieteenaloille.



Kuva 9. Geomagic Touch X -voimapalautelaite [3D Systems, Inc. 2019b].

3.5 Haptisen palautteen hyödyt

Miksi kosketusaistia sitten käytetään, tai miksi sitä kannattaisi käyttää ihmisen ja tietokoneen välisessä vuorovaikutuksessa ja virtuaalitodellisuudessa? Äkikseen voitaisiin ajatella, että näköaisti on sopiva, ja täysin riittävä muoto monissa eri tilanteissa. Graafiset käyttöliittymät vaativat huomattavasti vähemmän tehoa toimiakseen, ja ne ovat myös paljon halvempia kuin monet haptiset laitteet. Robles-De-La-Torren [2006] mukaan yleisesti myös ajatellaan, että visuaalinen informaatio dominoi kosketusinformaatiota silloin, kun molemmat ovat käytössä samaan aikaan.

Haptisen palautteen hyötyjä mietittäessä täytyykin ottaa huomioon sekä tuntoaistin ainutlaatuiset käyttömahdollisuudet, että sellaiset tilanteet, kun muut aistikanavat ovat ylikuormittuneet tai muutoin tilanteeseen sopimattomia [MacLean 2000]. Yleisesti voidaan sanoa, että haptinen palaute on tehokkaimmillaan ja antaa eniten arvoa yhdistettynä muihin aistimodaliteetteihin, ja siksi tulisikin suunnitella yhdessä niiden kanssa. Tavallisimmin haptinen palaute on yhdistetty visuaalisen palautteeseen, eli esimerkiksi ruudulla näkyvään kuvaan virtuaaliympäristöstä. Vaikka näköaisti dominoisikin aistikanavista saatavaa informaatiota, tuo haptinen palaute silti selvän lisän vuorovaikutukseen.

Kosketusaisti on voimakas ja käyttökelpoinen modaliteetti käyttöliittymäsuunnittelussa, ja tutkimuksissa haptisen palautteen on todettu auttavan virtuaaliympäristössä navigoinnissa, kuvaajien visualisoinnissa sekä rikastavan vuorovaikutusta käyttäjän ja tietokoneen välillä [Kuber *et al.* 2007]. MacLeanin [2000] mukaan se voi myös vähentää motorista ja visuaalista kuormitusta, kun tehtävä on vaativa tai pitkäkestoinen. Myös Hayward *et al.* [2004] toteaa, että

stressaavissa ja nopeatempoisissa ympäristöissä, kuten autolla ajaessa, haptisen palautteen avulla voidaan vähentää visuaalista kuormaa.

Aiemmin esitettyjen potilastapausesimerkkien jälkeen on selvää, että tuntoaisti on kriittinen tekijä ihmisen normaalien toimintojen kannalta aina kehon kontrolloimisesta ympäristön havainnointiin sekä sen kanssa vuorovaikuttamiseen asti. Tämän perusteella voidaan puoltaa tuntoinformaation tärkeyttä myös ihmisen ja tietokoneen välisessä vuorovaikutuksessa erilaisissa käyttöliittymissä. Miller ja Zeleznik [1998] arvioivat jo yli kaksikymmentä vuotta sitten, että haptisen palautteen lisääminen tavallisiin graafisiin käyttöliittymiin voisi lisätä niiden tehokkuutta, intuitiivisuutta, opittavuutta sekä nautittavuutta.

Haptisella palautteella on paljon potentiaalia auttaa etenkin sokeita käyttäjiä. Monenlaisia aputeknologioita, kuten näytönlukijoita sekä tietokoneeseen liitettäviä pistekirjoituslaitteita on jo olemassa, mutta niiden käyttö yksinään voi olla aikaa vievää ja liian kankeaa. Artikkelissaan Kuber *et al.* [2007] paransivat nettisivujen ei-visuaalista esitystä HTML-elementteihin reagoivan voimapalautteen avulla, minkä käyttäjät kokivat sekä tiedon etsintää että sivujen selausprosessia helpottavaksi.

Haptista palautetta voidaan käyttää myös opetus- ja harjoittelujärjestelmissä siten, että aluksi oppilasta ohjataan haptisten vihjeiden avulla, mutta myöhemmin niitä vähennetään tai vihjeet poistetaan kokonaan hänen osatessa tehtävän paremmin. Vastakohtana tälle haptista palautetta voidaan hyödyntää myös puhtaasti viihteellisissä järjestelmissä. Yksinkertaisesti mukavan tuntuiset, vaikkakin itsessään turhat haptiset ominaisuudet voivat kasvattaa vuorovaikutuksen mukavuutta mittaamattomasti. Tämän lisäksi haptinen palaute voi lisätä sosiaalista kontekstia vuorovaikutustilanteissa joko etäyhteydellä työskentelevien ihmisten, tai ihmisen ja tietokoneenkin välillä niin työ- kuin viihdekäytössä. [MacLean 2000] Haptisen palautteen avulla käyttäjälle voidaan myös ilmoittaa erilaisista tapahtumista huomaamattomasti, mutta informatiivisesti. Tutuin esimerkki tästä lienee kännykän värinätoiminto soittoa, viestejä tai erilaisia sovellusilmoituksia vastaanottaessa.

Haptinen palaute ja kyky koskea, tunnustella ja manipuloida objekteja virtuaaliympäristössä kasvattaa käyttäjän kokemaa immersion ja todellisuuden tunnetta huomattavasti. Srinivasanin ja Basdogan [1997] sanovat, että todennäköisesti jopa yksinkertainen haptinen käyttöliittymä yhdistettynä visuaaliseen ja kuulopalautteeseen kasvattavat koettua immersiiivisyyttä huomattavasti enemmän, kuin pelkästään suuret parannukset visuaalisessa palautteessa eli esimerkiksi näytön tarkkuudessa.

Artikkelissa Van der Meijden ja Schijven [2009] tutkivat haptisen palautteen nykyistä statusta ja sen arvoa tavanomaisissa ja robottiaivusteisissa tähystysleikkauksissa sekä harjoittelussa virtuaalitodellisuussimulaattorien avulla. Suurin osa kirjallisuuskatsauksen artikkeleista osoitti, että voimapalautelaitteita on hyötyä tähystysleikkauksilaitteisiin kiinnitettynä, ja vastaavasti haptisen palautteen puutteella on huonoja puolia. Haptisen palautteen uskotaan vähentävän leikkausten aikaisia virheitä ja jopa kasvattavan potilasturvallisuutta. Lisätutkimuksia kuitenkin tarvitaan, sillä nämä tutkimukset olivat yleisesti tehty kohtalaisen pienellä osallistujamäärällä (n. 20 henkilöä per tutkimus), ja tuloksissa oli kuitenkin jonkin verran ristiriitaisuutta. Virtuaalitodellisuussimulaattoreiden osalta yksi löydetyistä havainnoista oli, että haptinen palaute on tärkeää psykomotoristen taitojen harjoittelun alkuvaiheessa.

Våpenstad *et al.* [2013] perustelevat, että VR-leikkaussimulaattoreiden tulisi luoda kirurgeille mahdollisimman todentuntuinen ympäristö haasteineen kaikkineen, ja tässä tärkeässä roolissa on sekä näkö- että tuntoaistimukset. Esimerkiksi virtuaaliseen kudokseen tarttumista pihtien kaltaisen leikkausinstrumentin avulla on vaikea harjoitella ilman voimapalautetta, sillä liian pienellä puristuksella kudokseksi voi lipsahtaa instrumentin otteesta, ja liian suurella puristusvoimalla kudokseen voisi oikeassa leikkaustilanteessa syntyä vaurioita. Artikkelissa todetaan, että haptinen palaute on tärkeä osa virtuaalitodellisuussimulaattoreissa.

3.6 Haptisen palautteen haasteet

Haptinen palaute ei sovi kaikkiin ympäristöihin tai sovelluksiin. Monet voimapalautelaitteet soveltuvat käytettäväksi vain työpöytäympäristössä tehokkaan tietokoneen kanssa, mikä rajaa jo paljon käyttömahdollisuuksia ulkopuolelle. Tavallisimmat voimapalautelaitteet ovat tekniikaltaan kohtalaisen suurikokoisia, sekä vaativat paljon virtaa. Väriäpalautteen ongelmana taas on sen huomaamattomuus ja häviäminen ympäristön aiheuttamaan meluun ja tärinään, eikä tarisevaa kännykkää välttämättä huomaa autossa matkustaessa. Näkökulmasta riippuen myös haptisen kanavan yksityisyyttä voidaan pitää joko hyvänä tai huonona puolenä. Toisaalta informaation vastaanottaminen ei häiritse muita, mutta tämä myös rajaa käyttömahdollisuuksia. Haptisen laitteen täytyy sijaita kiinni ihossa, tai vähintään vain pienen etäisyyden päässä siitä, jotta ihminen tuntee hänelle tarkoitetun palautteen. MacLean [2000] myös muistuttaa, että kulttuurillisista syistä johtuen kaikki ihmiset eivät ylipäätään koe kosketusta luonnollisena tai miellyttävänä informaatiokanavana.

Voimapalautelaitteet vaativat täydellisesti toimiakseen paljon prosessointitehoa tietokoneelta. Laitteen tuottamaa palautetta on päivitettävä vähintään

1000 kertaa sekunnissa (1000 Hz) ihmisen todella tarkan tuntoaistin vuoksi, ja tätä matalammalla päivitystahdilla haptisen simulaation laatu voi heikentyä huomattavasti [Robles-De-La-Torre 2006]. Visuaalista palautetta ei tarvitse päivittää läheskään näin nopeasti, ja vertailun vuoksi esimerkiksi HTC Vive -VR-järjestelmän päivitystahti on vain 90Hz. Tehokkaan ja todennäköisesti kalliin tietokoneen lisäksi on huomioitava, että tavallisimmat voimapalautelaitteet itessäänkin maksavat useita tuhansia euroja. Merkityksellisen informaation välittäminen haptista kanavaa pitkin voi Kuberin *et al.* [2007] mukaan olla haasteellista, sillä nykyisillä laitteilla pystytään tuottamaan vain rajoitettu määrä toisistaan erilaisia haptisia tuntemuksia. Våpenstad *et al.* [2013] sanovat ettei laitteiden mekaaninen toimintakaan ole aina toivotulla tasolla, ja myös tästä syystä realistisen tuntuista haptista palautetta voi olla vaikea saavuttaa. Ihmiskehoon verrattuna parhaimmatkaan kuuden tai jopa seitsemän vapausasteen laitteet eivät voi mahdollistaa täydellistä vapaata liikettä, sillä ihmisen käsi pysyy jopa 22:teen liikesuuntaan eli vapausasteeseen [Srinivasan & Basdogan 1997].

Haptista palautetta virtuaalitodellisuudessa on Van der Meijdenin ja Schijvenin [2009] mukaan tutkittu vasta vähän, eikä sen optimaalisesta käytöstä ja tuntemuksien realismista oikeaan elämään verrattuna ole paljon tutkittua tietoa. Tämä on ongelmallista, sillä haptisen palautteen realistinen tuntu vaikuttaa suuresti kehitettävän sovelluksen tai järjestelmän onnistumiseen ja menestymiseen. Myös Oakley *et al.* [2000] artikkelissaan huomioivat, että teknologiat ja laitteet ovat kehittyneet viime vuosina nopeasti, mutta tutkimuksia niiden käytöstä, käytettävyydestä ja merkityksellisyydestä ei ole tehty samaan tahtiin. Tästä johtuen ei ole olemassa kattavia ohjeita tai suosituksia siitä, minkälainen palaute on sopivinta missäkin tilanteessa. Huonoimmassa tilanteessa tämä voi johtaa esimerkiksi sellaisten haptisten käyttöliittymien kehittämiseen, jotka ovat itse asiassa vaikeampia käyttää kuin vastaavat käyttöliittymät ilman haptiikkaa, ja jotka ei laisinkaan toimi sellaisena vuorovaikutusteknologian edistysaskeleena kuin sen uskotaan olevan.

Gescheiderin *et al.* [1994] tutkimuksesta selviää, että haptisen palautteen havaitsemiseen liittyy myös omat ongelmansa. Nykyään tiedetään jo hyvin, että ihmisen ikä vaikuttaa aistijärjestelmien toimintaan, eikä tuntoaisti ole tästä poikkeus. Tuntoaisti ei ole absoluuttinen aisti, ja sen herkkyys vähenee iän myötä. Tuntoaistiin vaikuttaa iän lisäksi myös sukupuoli, sillä naisten on todettu pärjäävän näissä tutkimuksissa miehiä paremmin. Stevens ja Patterson [1995] havaitsivat, että etenkin sormenpäät ovat alttiit ikääntymisestä johtuvalle tuntoaistin heikentymiselle, mutta yhtä suurta eroa ei havaittu huulissa tai käsivar-

sissa. Yhtenä mahdollisena syynä tähän voidaan pitää heikentyvää ääreisverenkiertoa. Muita tuntoaistiin mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä heidän mukaan ovat yksilölliset anatomiset erot, sairaudet, vammat sekä kokemus.

4 Vuorovaikutus virtuaalitodellisuudessa

4.1 Erilaisia vuorovaikutustapoja

Kolmiulotteiset virtuaalitodellisuuskäyttöliittymät eroavat merkittävästi tavallisista kaksiulotteisista WIMP-käyttöliittymistä (Windows, Icons, Mouse and Pointer, eli ikkunat, ikonit, hiiri ja osoitin), joihin olemme tietokoneissa tottuneet. Virtuaalitodellisuussovelluksien sisällöt vaihtelevat, eikä niille ole määritetty yhteisiä komponentteja, toimintatapoja tai edes standardisoituja laitteita. [Rorke *et al.* 1998] Ensimmäisillä käyttökerroilla käyttäjän on siten aina opeteltava kuinka vuorovaikutus juuri kyseisessä VR-sovelluksessa toimii. Navarren *et al.* [2005] mukaan vuorovaikutustavat virtuaalitodellisuuden kanssa monipuolistuvat koko ajan, kun uusia laitteita kehitetään ja ne saapuvat markkinoille. Bowman *et al.* [2001] muistuttavat nopean kehitystahdin asettavan haasteita sekä sovelluskehittäjille että käyttäjille, ja siksi virtuaalitodellisuussovellukset tulisikin suunnitella erityisen huolellisesti.

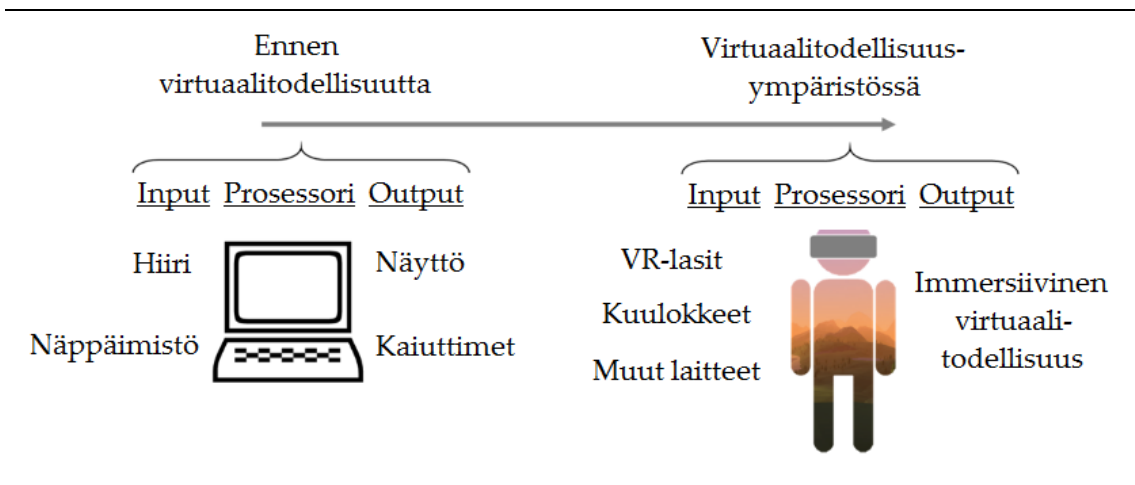
Jotta vuorovaikutus virtuaalitodellisuuden kanssa koettaisiin mahdollisimman helppona ja luonnollisena, on Burdean *et al.* [1996] mukaan järkevää hyödyntää mahdollisimman montaa ihmisen aistia. Järjestelmän tulisi olla myös helppokäyttöinen ja mahdollistaa käyttäjän vapaa liike, eikä järjestelmän käytöstä pitäisi aiheutua väsymystä tai kipua. Parhaassa tapauksessa VR-järjestelmä onkin ”läpinäkyvä”, responsiivinen ja tuntuu luonnolliselta.

Sellaista virtuaalitodellisuusympäristöä, joka hyödyntää kahta tai useampaa ihmisen aistia, kutsutaan *multimodaaliseksi* eli moniaistiseksi ympäristöksi [Frittschi *et al.* 2008]. Yleensä ainakin näköaistia käytetään, mutta periaatteessa ihmisen viidestä aistista voidaan valita millainen yhdistelmä tahansa. Tällaisten järjestelmien tavoitteena on Bowmanin *et al.* [2001] mukaan tarjota käyttäjälle rikkaampi käyttökokemus verrattuna yksiaistisiin käyttöliittymiin, ja Hinckleyn *et al.* [2014] mukaan tehdä vuorovaikutuksesta nopeampaa, tehokkaampaa sekä miellyttävämpää. Maku- ja hajuaistin hyödyntämistä ei käsitellä tässä työssä ollenkaan.

Vuorovaikutus virtuaalimaailman kanssa tapahtuu erilaisten laitteiden ja niihin liittyvien ohjelmistojen välityksellä. Laitteet voidaan jakaa input- eli *syöttölaitteisiin*, joiden avulla käyttäjä käsittelee virtuaalimaailman tilaa tai objekteja, sekä output- eli *palautelaitteisiin*, joiden kautta tietoa virtuaalimaailmasta välitetään takaisin käyttäjälle. Tutuin esimerkki perinteisestä syöttölaitteesta on tietokoneen hiiri, jonka avulla käyttöliittymää ohjataan, ja palautelaitteesta näyttö, josta käyttöliittymän tila voidaan nähdä. Virtuaalitodellisuudessa vuorovaikutus ei rajoitu ainoastaan tällaisiin osoitus- tai valitsemistehtäviin, vaan mahdol-

lisuudet ovat paljon monipuolisemmat [Hinckley *et al.* 2014]. Jo yli 15 vuotta sitten oli olemassa satoja erilaisia virtuaalitodellisuuteen sopivia laitteita [Bowman *et al.* 2001], ja määrä kasvaa koko ajan.

Yleisesti voidaan sanoa, että virtuaalitodellisuudessa syöttökanavana ovat omat aistimme (laitteiden välityksellä), ja palautekanavana oma havaintokykymme. Jopa silmämme voivat nykyään toimia katseenseurannan avulla syöttökanavina. Kang *et al.* [2014] tutkivat ihmisen tarkkaavaisuustason mittaamista pupillien koon perusteella, joten ehkä tulevaisuudessa tietokone voi automaattisesti helpottaa tiettyjä toimintoja, jos käyttäjällä näyttää olevan vaikeuksia tehtävän suorittamisessa (esimerkiksi suurentaa fonttikokoa jos artikkelin lukeminen on vaikeaa). Kuvassa 10 esitetään, kuinka vuorovaikutus tietokoneen kanssa on muuttunut. Tactai Inc. [2018] mukaan virtuaalitodellisuudessa informaatio voi olla kaikkialla ihmisen ympärillä, eikä ainoastaan tietokoneen näytöllä. Tällöin ihmisestä itsestään tulee tavallaan prosessori, koska virtuaalitodellisuuden havainnoiminen riippuu ihmisen aivojen kyvystä luoda tarkoin määritellyistä syötteistä ja palautteista kokonainen uusi ympäristö.



Kuva 10. Ihmisen ja tietokoneen välisen vuorovaikutuksen evoluutio [muokattu Tactai Inc. 2018 pohjalta].

Vuorovaikutus virtuaalitodellisuuden kanssa perustuu Kaiserin *et al.* [2003] mukaan yleensä *suoran manipulaation* metaforaan, jolloin objektia käsitelläkseen käyttäjän on pakko koskea sitä. Tämä toimii hyvin, jos kohdeobjektit ovat tiedossa ja käden ulottuvilla, mutta aina näin ei kuitenkaan ole. Tutkijat ovat kehittäneet monia vaihtoehtoisia tapoja kauempana olevien objektien käsittelyyn aina uudenkaltaisista paljon painikkeita sisältävistä ohjauslaitteista ns. "venyviin käsiin". Tämä on turhan monimutkaista, ja artikkelin mukaan ongelma voitaisiin ratkaista helpommin moniaistisella vuorovaikutuksella esimerkiksi puhe- tai eleohjauksen avulla. Kok ja van Liere [2007] huomioivat, että objektien

käsittelyn lisäksi myös erilaisten painikkeiden painaminen tai asetusten muuttaminen voi olla kolmiulotteisessa tilassa haasteellista. Perinteisessä työpöytäympäristössä olemme tottuneet tekemään nämä toiminnot hiirellä sekä näppäimistöllä, mutta 3D-maailmassa tämä ei välttämättä ole paras tapa, ja siten erilaisille moniaistisille ratkaisuille on todella tarvetta.

Viime vuosina tietokoneiden tehokkuus sekä uudet teknologiat ovat onneksi kehittyneet huimasti. Saadin *et al.* [2018] mukaan yksi uusi nopeasti kehittynyt alue on katseenseuranta, jonka avulla kokemukset virtuaalitodellisuudessa voivat parantuvat entisestään. Katseenseuranta on potentiaalinen teknologia sekä virtuaalitodellisuuden että lisätyn todellisuuden sovelluksissa. Kravelen ja Poelman [2010] selventävät, että sen avulla käyttäjän katseen suunta voidaan määritellä seuraamalla pupilleja pienten kameroiden avulla, ja jos katseenseuranta on toteutettu hyvin, voidaan sitä käyttää hyvin luonnollisesti ja nopeasti ympäristön kanssa kommunikoimiseen. Katseenseuranta ei vaadi käsien käyttöä, ja silti sitä voidaan käyttää jopa hiiren tai muun valintatyökalun korvikkeena. Kameran täytyy sijoittaa suoraan VR-laseihin, ja ne on kalibroitava jokaiselle käyttäjälle erikseen tahattomien silmänliikkeiden suodattamiseksi. Hinkley *et al.* [2014] puolestaan muistuttavat, että silmänliikkeiden tulkinta tulee tehdä huolellisesti, sillä muuten vaarana on ”Midaksen kosketuksen” kaltainen ongelma. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttäjän katsetta tulkitaan liian herkästi, ja esimerkiksi kaikki valikot tai painikkeet mitä käyttäjä vilkaisee, tulevat heti valituksi tai painetuksi.

Myös puheohjauksen on todettu olevan oiva apu järjestelmien kontrollointiin. Puhekäskyt voidaan tuottaa samanaikaisesti, kun kohteen kanssa ollaan vuorovaikutuksessa kolmiulotteisesti, ja käyttäjä voi näin keskittyä itse ympäristöön. Puheella voidaan ohjata erilaisia asioita zoomauksesta esineiden nostamiseen tai asetusten muokkaamiseen. Puheohjauskin sisältää silti omat ongelmansa luonnollisen kielen tulkinnasta ja puheen kuuntelun aktivoimisesta lähtien. [Kok & van Liere 2007] Onnistuneesti käytettynä puheohjauksen avulla voidaan suorittaa tehtäviä sellaisissa tilanteissa, kun sekä käyttäjän kädet että silmät ovat suunnattuna muihin kohteisiin tai tehtäviin [Kaiser *et al.* 2003].

Hinckley *et al.* [2014] mukaan kolmiulotteiset eleet tai asennot sopivat myös virtuaalitodellisuuden kanssa vuorovaikuttamiseen. Käytetystä teknologiasta riippuen eleohjaus voi vaatia jonkun laitteen, kuten virtuaalitodellisuusohjaimen kädessä pitämistä, tai sitten eleet voidaan tunnistaa erilaisten kameroiden avulla ilman kädessä pidettävää tai päälle puettavaa tekniikkaa.

Erityisesti haptisen palautteen yhdistäminen virtuaalitodellisuuteen lisää vuorovaikutuksen todenmukaisuutta, kun käyttäjä tuntee koskevansa oikeita

esineitä, vaikka todellisuudessa hän on vuorovaikutuksessa vain virtuaalisten versioiden kanssa [Carvalho 2016]. Tuntoaisti on erittäin tärkeä aisti ihmisen jokapäiväisessä vuorovaikutuksessa oikean ympäristön kanssa, joten se mahdollistaa paljon toimintoja myös virtuaalitodellisuudessa. Haptista palautetta käsiteltiin laajemmin edellisessä luvussa, joten tässä siihen ei enää syvennytä tarkemmin.

Yksi virtuaalitodellisuuteen liittyvistä ongelmista on, että normaalisti kaksiulotteinen toiminta täytyy muuttaa kolmiulotteiseksi [Bowman *et al.* 2001]. Tällaisia ovat artikkelin mukaan juuri järjestelmän ohjaukseen ja asetuksiin liittyvät toiminnot, jotka normaalisti suoritetaan hiirellä tai näppäimistöllä. Jos valikkorakenne toteutetaan vastaavana mutta kolmiulotteisena versiona virtuaaliympäristöön ilmaan leijumaan, voi vuorovaikutustavasta riippuen käyttäjältä puuttua fyysisen pöydän antama tuki sitä käsitellessä, kun vuorovaikutukseen ei käytetäkään hiirtä. Tästä syystä kaksiulotteisella vuorovaikutuksella onkin joitain etuja verrattuna kolmiulotteiseen vuorovaikutukseen tiettyihin tehtäviin liittyen. Etenkin jos haptista palautetta ei virtuaalitodellisuudessa käytetä, on kaksiulotteinen tapa fyysisen pöydän päällä huomattavasti helpompi esimerkiksi tekstin kirjoittamiseen. Bowmanin *et al.* [2001] mukaan kaksiulotteisten ja kolmiulotteisten vuorovaikutustapojen yhdistäminen kolmiulotteisissa sovelluksissa voi mahdollistaa sellaiset käyttöliittymät, jotka ovat entistä helpompia ja intuitiivisempia käyttää. Srinivasan ja Basdogan [1997] sanovat että, virtuaalitodellisuussovelluksien ja niiden vuorovaikutusratkaisujen suunnittelun täytyisikin perustua ihmisen havainto- ja suorituskäyttöön, jotta niiden käyttö olisi luonnollista ja helppoa. Seuraavaksi esitellään kolme haptista palautetta mielekkäällä tavalla hyödyntävää virtuaalitodellisuussovellusta.

4.2 Esimerkkitutkimuksia haptisen palautteen hyödyntämisestä

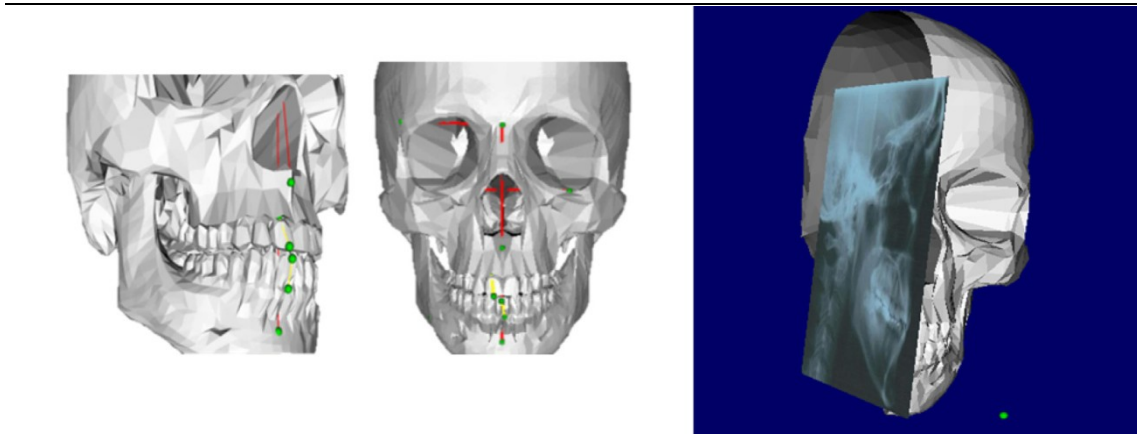
Medellín-Castillo *et al.* [2016] tutkivat haptisen palautteen soveltuvuutta radiologiseen kefalometriseen analyysiin (cephalometry) eli kallon mittasuhteiden tutkimukseen. Analyysia käytetään hyväksi suun ja leukaluiden alueen leikkaussuunnittelussa, ja se suoritetaan etsimällä ja merkkaamalla standardoituja anatomisia merkkipaikkoja ja mittaamalla näiden välisiä suhteita. Perinteisesti mittasuhteiden analyysiin on käytetty 2D-röntgenkuvaa, mutta monien leikkauksista vaativien potilaiden kallo on epäsymmetrinen, eikä tämä vaihtoehto ole siksi ihanteellinen. Tutkimuksissa suositellaankin 3D-kefalometristä analyysia tarkemman diagnoosin ja analyysin saavuttamiseksi. Toisaalta tutkimuksissa on myös huomattu, että 3D-mallin merkkaukset voi olla sekä vaikeaa että aikaa vievää, ja että nykyisiä kefalometrisen analyysin sovelluksia pitäisi huomattavasti kehittää niin käytettävyyden kuin intuitiivisuuden osalta. Tutkijat tarttui-

vat tähän ongelmaan, ja pyrkivät ratkaisemaan nykyisten sovellusten ongelmat haptisen teknologian avulla.

Perinteisten manuaalisten 2D-menetelmien ongelmia ovat anatomisten pisteiden merkkauksen vaikeus, kolmiulotteisen mallin esittäminen kaksiulotteisena sekä potilaiden kallojen epäsymmetrisyys. Esimerkiksi anatomisten pisteiden merkkaustarkkuus on suoraan verrannollista tekijän kokemukseen ja taitotasoon. Edes tietokoneavusteiset 2D-sovellukset eivät ole ratkaisseet kaikkia näitä ongelmia, vaikka ne hieman nopeuttaakin analyysia. 3D-menetelmien hyviksi puoliksi on tutkimuksissa havaittu seuraavat asiat: oikeat anatomiset rakenteet pystytään tunnistamaan, 3D-2D-heijastusongelmista päästään eroon sekä kallon epäsymmetrioita pystytään tarkastelemaan. Muutamia siihen liittyviä ongelmiaakin on, esimerkiksi 3D-mallien käsittely on lääkäreille monesti vaikeaa, sillä he ovat jo tottuneet 2D-sovelluksiin ja -röntgenkuviin, jotkin anatomiset pisteet on vaikeampi merkata 3D-malliin, eikä tapoja ja sääntöjä ole vielä standardoitu.

Tutkijat kehittivät OSSys-nimisen haptista palautetta hyödyntävän virtuaalitodellisuuspohjaisen sovelluksen (kuvassa 11) leukaluiden leikkausten suunnitteluun, simulointiin sekä harjoitteluun. Järjestelmä tuki Phantom Omni- ja Falcon-voimapalautelaitteita. Haptisen 3D-analyysin lisäksi järjestelmä tuki myös 2D-, 2½D- sekä ei-haptisia 3D-analyysijä. Käyttäjä pystyi liikkumaan virtuaalitodellisuudessa vapaasti sekä tunnustelemaan 3D-objekteja ja merkkamaan anatomisia pisteitä voimapalautelaitteen avulla. Kun kaikki määrätty anatomiset pisteet oli merkattu, järjestelmä laski tiettyjä prosessiin liittyviä arvoja ja tuotti käyttäjälle raportin.

Järjestelmää arvioitiin käyttäjätesteillä, joihin osallistui 21 alan kirurgia. Laitteisiin ja järjestelmään tutustumisen jälkeen osallistujat suorittivat testitehtävät ja täyttivät kyselylomakkeen. Haptisen palautteen todettiin sopivan kolmiulotteiseen digitaaliseen kallonmittaustehtävään hyvin. Tehtävä oli tällä tavalla intuitiivisempi kuin perinteisillä menetelmillä suoritettuna, ja myös virheiden sekä tehtävään käytetyn ajan todettiin vähentyneen. Toisaalta merkkaukpisteiden sijainti oli välillä vaikeampi hahmottaa 3D-mallista kuin röntgenkuvasta, mutta tämänkin uskottiin johtuvan pitkälti kokemuksen puutteesta. Röntgenkuva pystyttiin myös yhdistämään 3D-malliin ja tutkijat kutsuivat tällaista 2½D-vuorovaikutukseksi.

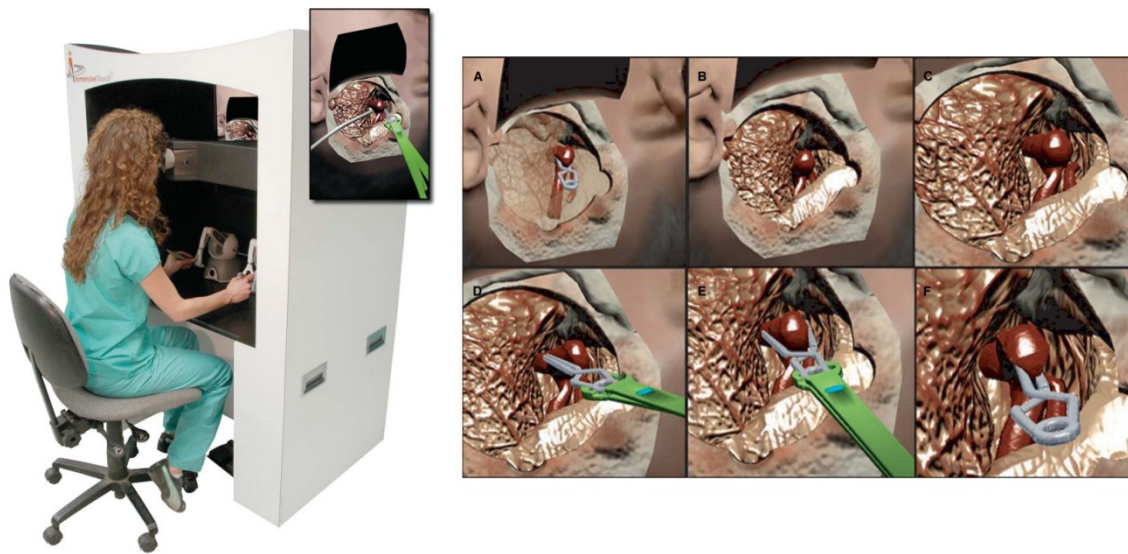


Kuva 11. OSSys-järjestelmä: vasemmalla 3D-mallin merkkäus ja oikealla 3D-mallin ja röntgenkuvan yhdistäminen (2½D-malli) [Medellín-Castillo *et al.* 2016].

Alaraj *et al.* [2015] puolestaan tutkivat haptisen palautteen käyttöä immersivisessä virtuaalisessa harjoittelusimulaattorissa neurokirurgian alalla. Tutkijat kehittivät simulaattorin aivoissa sijaitsevan valtionepullistuman operoimiseen avoleikkauksena (puristimen avulla), sillä erikoistuvat lääkärit tarvitsevat harjoittelua, mutta todellisessa elämässä näitä leikkauksia suoritetaan yhä vähemmän avoleikkauksena ja enemmän suonensisäisesti (endovaskulaarisesti). Avoleikkauksessa suoritetaan vain vaikeimpia tapauksia, eivätkä nämä tapaukset sovellu uuden leikkausprosessin harjoitteluun.

Simulaattori (esitetty kuvassa 12) kehitettiin ImmersiveTouch-alustaa käyttäen, ja 3D-mallit ihosta, pääkallosta, aivokudoksesta sekä verisuonista luotiin CT-angiografia- eli tietokonekerroskuvausdatasta. Simulaattorissa käytettiin kahta Geomagic Touch -voimapalautelaitetta yhtä aikaa, jotka virtuaalitodellisuudessa vastasivat oikean elämän työkaluja leikkaussalissa. Haptinen palaute vaihteli riippuen siitä, mitä kudosta käsiteltiin. Onnistuneen toimenpiteen lisäksi simulaattorissa mahdollistettiin myös käyttäjän toimista johtuva leikkauksenaikainen valtimonpullistuman repeytyminen, tästä johtuva verenvuotaminen sekä puristimen uudelleenasettaminen.

Simulaattoria testasi 17 neurokirurgiaan erikoistuvaa lääkäriä. Heiltä kerättiin palautetta simulaattorin hyödyllisyydestä sekä samankaltaisuudesta oikeaan leikkaukseen verrattuna. Yleisesti ottaen simulaattorin koettiin olevan hyödyllinen oppimisväline oikean elämän leikkaukseen valmistautuessa. Kaksi kolmasosaa osallistujista piti anatomisia yksityiskohtia realistisina, ja yksi kolmasosa piti haptista palautetta oikeaa elämää vastaavana. Tulevaisuudessa tul-laankin tarvitsemaan aina vain parempia ja tehokkaampia haptisia laitteita, mutta jo nykyisillä laitteilla ja tällä sovelluksella kirurgien suoritukset saattavat parantua.



Kuva 12. Virtuaalitodellisuussimulaattori valtimonpullistuman operoimiseen [Alaraj *et al.* 2015].

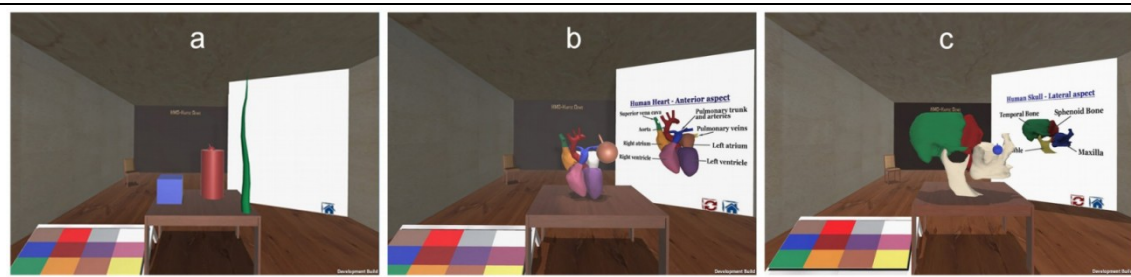
Saad *et al.* [2018] kehittivät virtuaalitodellisuussovelluksen käyttäen ainoastaan kuluttajille suunnattuja virtuaalitodellisuuslaseja, keskihintaista voimapalautelaitetta sekä pelinkehitystyökalu Unity:ä. Nämä ovat samat komponentit, joita käytin myös tämän tutkielman tutkimusosiossa (esitellään luvuissa 5 ja 6). Artikkelin tutkimuksessa käytettiin Oculus Rift -VR-laseja sekä Phantom Premium 1.5 -voimapalautelaitetta. Kuluttajille suunnattuja virtuaalilaseja ja voimapalautelaitteita yhdistäviä tutkimuksia ei ole kirjoittajien mukaan tehty vielä kovin paljoa, vaikka molempien laitteiden käyttö yksinään on auttanut luomaan immersiiivisiä virtuaalitodellisuussovelluksia. Artikkelin sovelluksen tavoitteena oli tarjota käyttäjille immersiivinen virtuaalitodellisuusympäristö, jossa he voivat koskea, tunnustella sekä manipuloida 3D-malleja haptisen laitteen avulla. Sovellus on esitetty kuvassa 13. Sovelluksessa käytettiin kahta anatomista mallia, sydäntä sekä osaa pääkallosta.

Haptisen palautteen lisäksi järjestelmässä hyödynnettiin katseenseurantaa. Käyttäjä valitsi halutun kohtauksen (harjoittelun tai sydän- tai pääkallomallin) sovelluksen alunäytössä sitä katsomalla, ja sen jälkeen painamalla haptisen laitteen painiketta. Haptista laitetta pidettiin oikeassa kädessä, ja vasemmalla kädellä käyttäjä ohjasi virtuaalitulassaan liikkumista joko näppäimistön tai peliohjaimen ohjaussauvan avulla.

Viisi opiskelijaa testasi järjestelmää. He olivat aiemmin käyneet tai kävivät samaan aikaan sisäelINANatomian kurssia, ja heidän tuli suorittaa sovelluksessa kolme tehtävää. Tehtäviin kulunutta aikaa mitattiin. Ensimmäinen tehtävä oli sydänmallin väriytysovelluksessa esitetyn 2D-kuvan kaltaiseksi, toinen mallin

käsittely ja tutkiminen ja kolmas sovelluksessa liikkuminen peliohjaimen avulla. Testitilanteen jälkeen osallistujat täyttivät kyselylomakkeen. Tämän jälkeen osallistujille tarjottiin mahdollisuutta kokeilla järjestelmää uudestaan monimutkaisemman pääkallomallin kanssa. Tämä malli oli tiedostokooltaan myös suurempi, ja saattoi siten aiheuttaa järjestelmän hidastumista ja huonomman visuaalisen palautteen johdosta myös huonovointisuutta käyttäjälle.

Yksilölliset suoritusajat varsinaisille testitehtäville olivat lyhyitä, joka tarkoitti, että järjestelmää oli helppo käyttää ja se opittiin nopeasti. Yhtä lukuun ottamatta kaikki käyttäjät tutkivat vapaaehtoisesti pääkallomallia yli 4,5 minuuttia, mikä taas osoitti, että järjestelmä oli kiinnostava ja piti käyttäjän mielenkiintoa yllä. Kaikki käyttäjät antoivat positiivista palautetta järjestelmän käytöstä, ja kokivat että se oli sekä hyödyllinen opetustarkoituksessa että helppokäyttöinen. Myös haptisen laitteen käyttö oli helppoa, ja sen antama palaute koettiin realistiseksi. Yksi käyttäjä mainitsi suullisesti, että välillä haptisen laitteen osoitinta oli vaikea havaita tai löytää virtuaalimaailmassa. Kaksi käyttäjää kommentoi haptisen laitteen ja peliohjaimen käytön haastavuudesta, sillä VR-lasit peittivät käyttäjän näkökentän oikeaan maailmaan. Neljä käyttäjää ei ollut tyytyväinen virtuaalilasien resoluutioon, ja kolme käyttäjää tunsu sekavuutta tai huimausta testin jälkeen. Tutkimuksen loppupäätelmissä todettiin, että virtuaalitodellisuuslasien ja voimapalautelaitteen yhtäaikainen käyttö voi parantaa 3D-mallien kanssa vuorovaikutusta, mutta vielä tarvitaan lisää syvällisiä tutkimuksia tällaisten järjestelmien käyttökelpoisuudesta ja käytettävyydestä spesifeihin sovellusalueisiin liittyen.



Kuva 13. Kolme näkymää Saadin *et al.* [2018] kehittämästä haptiikkaa hyödyntävästä virtuaalitodellisuussovelluksesta.

5 Haptinen palaute leikkaussuunnittelussa

Tästä luvusta alkaa tämän tutkielman oman tutkimuksen osuus. Työskentelin kesällä 2018 Tampereen yliopiston Digital and Physical Immersion in Radiology and Surgery -projektissa, jonka tarkoituksena on reilun kahden vuoden aikana luoda uudenlainen tehokas, tarkkuutta lisäävä ja työskentelyä helpottava työskentelymenetelmä lääketieteen ja etenkin radiologian alalle. Kesällä projektissa oli meneillään useamman kuukauden pituinen valmisteluvaihe, jonka aikana kehitin yhdessä toisen tutkijan kanssa ensimmäisiä lääkäreille esiteltäviä versioita haptista palautetta hyödyntävästä virtuaalitodellisuussimulaatiosta. Valmisteluvaiheen tarkoitus oli testata erilaisia vuorovaikutustapoja ja suunnitella ja toteuttaa tärkeimpiä ominaisuuksia. Laajempaan varsinaiseen projektiin osallistuu Tampereen yliopiston lisäksi muutamia sopivien alojen yrityksiä, ja se tulee laajentamaan perinteisen hiiri-tietokonetyöskentelyn luontevaksi moniaistiseksi immersiiiviseksi virtuaalitodellisuusratkaisuksi [Raisamo & Rinta-Kiikka 2018].

Miksi virtuaalitodellisuuden käyttö ylipäättään sopii radiologien työtehtäviin? Yksinkertaisuudessaan siksi, että kolmiulotteisesta ihmisestä kuvattua kolmiulotteista kuvantamistietoa olisi järkevämpää myös tarkastella kolmiulotteisesti. Craig *et al.* [2009] toteavat, että mikä tahansa luontaisesti kolmiulotteinen ongelma voidaan saada toimimaan hyvin virtuaalitodellisuudessa sen kolmiulotteisen näkymän ja syötekanavien ansiosta. Medellín-Castillon *et al.* [2016] mukaan nykyisten radiologisten ohjelmistojen haaste onkin 3D-objektien ja kuvien käsittely ja tarkastelu tavallisen tietokoneen 2D-ruudun kautta, jolloin se on tarpeettoman monimutkaista, virhealtista ja kaiken lisäksi vaatii pitkän opetteluajan. Raisamon ja Rinta-Kiikan [2018] mukaan työskentely helpottuisi ja olisi nopeampaa immersiiivisen ja luonnollisen tekoälyä ja haptista palautetta hyödyntävän puhe-, katse- ja eleohjaukseen perustuvan ratkaisun avulla.

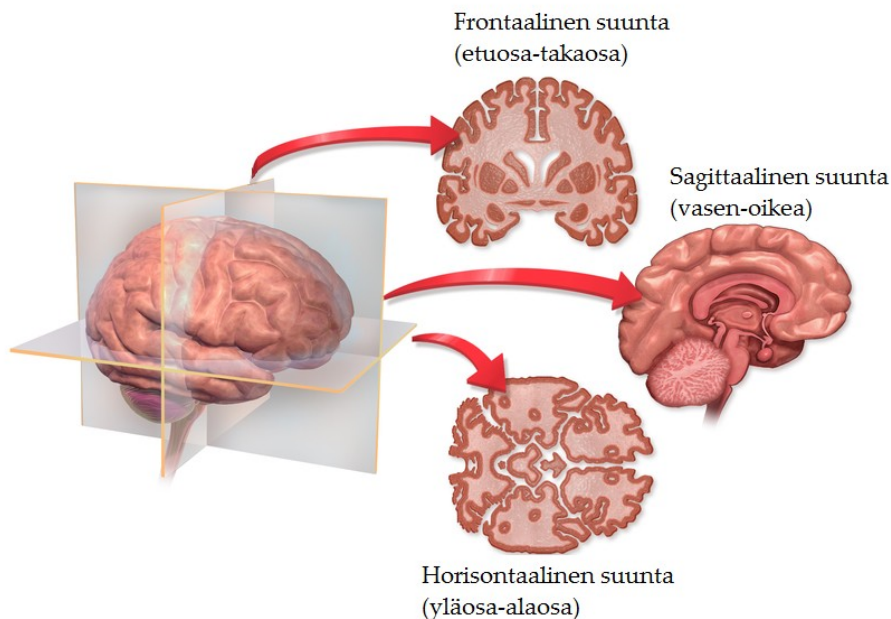
Tuntopalautteen avulla kolmiulotteinen kuvarata ja kudokset taas saadaan käsinkosketeltaviksi, joka helpottaa mm. anatomisten ja patologisten rakenteiden hahmottamista. Esimerkiksi leikkaussuunnittelua tehtäessä lääkäri voisi sekä nähdä että tuntea, miten esimerkiksi leukaluun leikkaus tullaan tekemään ja kuinka lähellä kriittiset hermot ja verisuonet leikkauslinjaa ovat. Laajassa mittakaavassa tämä voi parantaa toimenpiteisiin valmistautumista ja ennaltaehkäistä komplikaatioita.

Seuraavaksi esiteltävän simulaation tarkoituksena oli antaa lääkäreille ensituntumaa haptisista laitteista ja virtuaalitodellisuudesta, kehittää ja testata erilaisia vuorovaikutustapoja ja selvittää mikä ylipäättensä on mahdollista ja millä aikataululla.

5.1 3D-malli

Simulaation työstäminen alkoi 3D-mallin luomisella. Projektissa päätettiin keskittyä aluksi vain pään ja kaulan alueen käsittelyyn, ja siksi ensimmäiseksi 3D-malliksi valittiin pään luut. 3D-malli on luotu oikean potilaan tietokonekerroskuvaus- eli CT-datasta, joka saatiin tutkimuskäyttöön Tampereen yliopistollisesta sairaalasta. CT-kuvauksessa kehon tutkittavasta alueesta otetaan poikkeileikkauskuvia röntgensäteiden avulla, ja otetut kuvat tallennetaan DICOM-tiedostossa (akronyymi sanoista Digital Imaging and Communications in Medicine) useina 2D ”viipaleina” eli ruutuina, jotka vastaavat kolmiulotteisen kuvan eri kerroksia [Vidholm 2008].

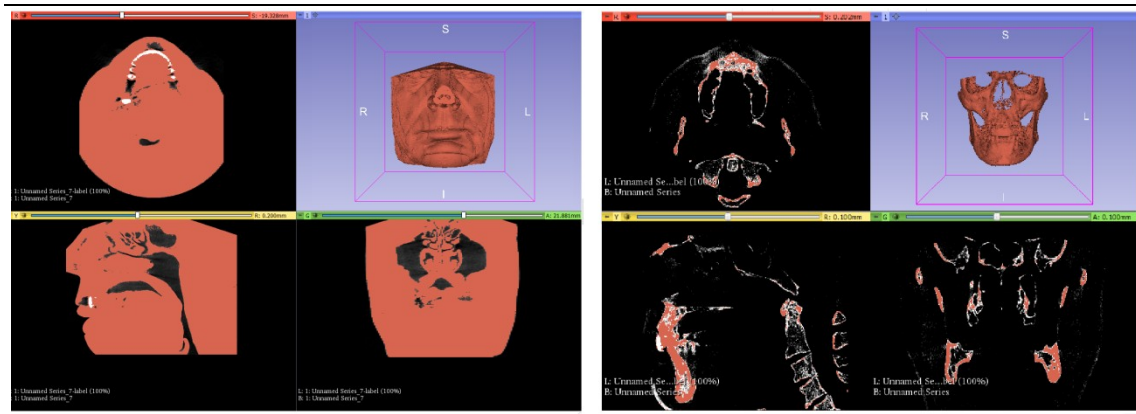
Ensimmäisessä vaiheessa DICOM-tiedostot avattiin 3D Slicer:illa, joka on ilmainen avoimen lähdekoodin ohjelmisto lääketieteellisten kuvien käsittelyyn ja visualisointiin. 3D Slicer näyttää kerroskuvat kolmesta lääketieteessä vakiintuneesta eri suunnasta, jotka ovat horisontaalinen (ylhäältä alas), sagittaalinen (vasemmalta oikealle) sekä frontaalinen (edestä taakse) suunta. Kuvia voi selata edes takaisin jokaisesta suunnasta. Suuntia kutsutaan myös anatomisiksi ta-soiksi, ja niitä havainnollistetaan kuvassa 14.



Kuva 14. Anatomiset suunnat [muokattu Blausen.com Staff 2014 pohjalta].

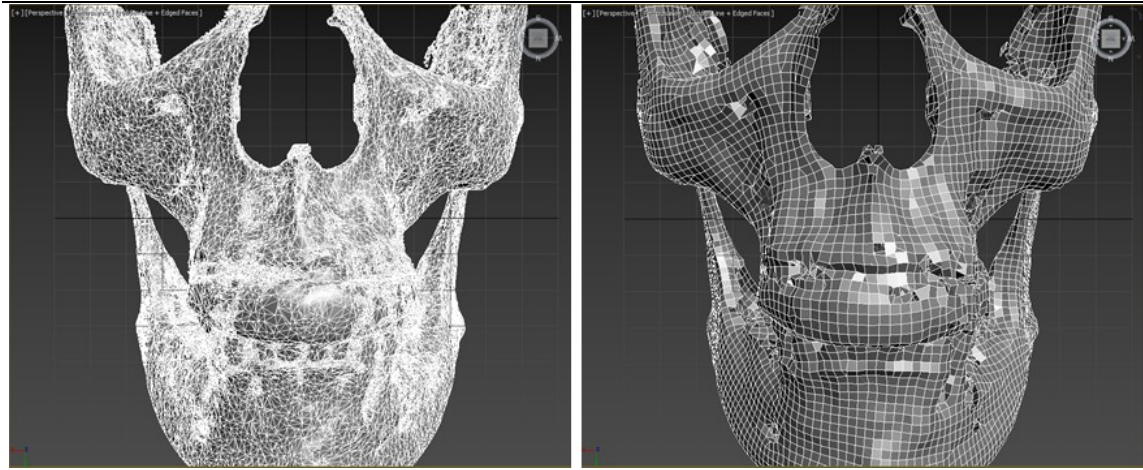
Näiden kolmen suuntanäkymän sekä liukusäätimien avulla kuvista valittiin tietyt harmaan sävyn alueet, joista 3D-malli tehtiin. Tätä vaihetta kutsutaan segmentaatioksi. Jos harmaan sävyjä on valittuna paljon, tulee 3D-malliin mukaan mm. lihaksia ja muita pehmytkudoksia, mutta jos arvot on valittu tarkemmin, saadaan tiheyserojen ansiosta valittua vain luut, jotka kuvassa näky-

vät kirkkaimmin. 3D Slicer -ohjelmiston liukusäätimiä ja niiden vaikutusta valittuun alueeseen on havainnollistettu kuvassa 15. Vasemmassa kuvassa on punaisella valittuna sekä pehmytkudokset että luut, oikealla raja-alue on tehty tarkemmin vain luukudokseen. Valittujen kudosten perusteella tehty 3D-malli näkyy kuvien oikeassa ylä-laidassa. Mallista leikattiin pahimmat epätasaisuudet sekä esimerkiksi selkäranka pois käyttäen 3D Slicer:in leikkaustyökalua, ja sen jälkeen malli tallennettiin 3D-geometriaa ja objekteja edustavana .obj-tiedostona.



Kuva 15. 3D-mallin luominen CT-kuvien pohjalta 3D Slicer -ohjelmassa.

3D-mallin pinta koostuu monikulmioista eli polygoneista. Mitä monimutkaisempi tämä *polygoniverkko* (polygon mesh) on, sitä suurempi on polygonien määrä sekä näin ollen myös tiedoston koko. Pääkallomalli oli tässä vaiheessa tiedostokooltaan vielä huomattavan suuri, joten muokkauksia jatkettiin erilaisilla ohjelmistoilla. Segmentaatio on ammattilaisillekin tarkoitetuilla ohjelmistoilla haastavaa, ja kokemattomuuden sekä ilmaisohjelmiston vuoksi malliin jäi muutamia ylimääräisiä reikiä. Suurimmat reiät mallin pinnassa täytettiin ilmaisella 3D-mallinnusohjelma Blender:illä, ja mallin pintaa taas tasoitettiin 3D-mallinnus- ja animointiohjelmisto 3ds Max:illa. Pintaa ja sen epätasaisuuksia yksinkertaistettiin huomattavasti myös InstantMeshes -ohjelmiston automaattisella pinnan uudelleenmuodostuksella. Kuvassa 16 esitetään alkuperäinen polygoniverkko sekä huomattavasti yksinkertaisempi muokattu pinta.



Kuva 16. Vasemmalla alkuperäinen hyvin tarkka polygoniverkko ja oikealla InstantMeshes-ohjelmiston avulla yksinkertaistettu lopullinen versio.

Muokkauksia tehtiin malliin melko paljon, sillä simulaatiossa tässä vaiheessa tärkeämpää oli toimivuus kuin lääketieteellinen oikeellisuus. Malli ei muutenkaan ollut lääketieteellisestä näkökulmasta täydellinen, sillä esimerkiksi potilaan hampaita ei saatu ilmaisohjelmalla liukusäätimien eri asetuksista huolimatta näkyviin. Mallia siis muokattiin yksinkertaisemmaksi ja tiedostokooltaan pienemmäksi siksi, jotta tietokone jaksaisi käsitellä sitä paremmin. Tämä on nykyistenkin tietokoneiden aikaan vielä merkittävä ongelma. Sutherlandin *et al.* [2018] mukaan anatomisen tarkkuuden kannalta mallien täytyisi olla mahdollisimman yksityiskohtaisia, mutta tietokoneiden rajoitukset huomioon ottaen niitä on käytännössä pakko jollain tavalla yksinkertaistaa sujuvan ja reaaliaikaisen käytön takaamiseksi.

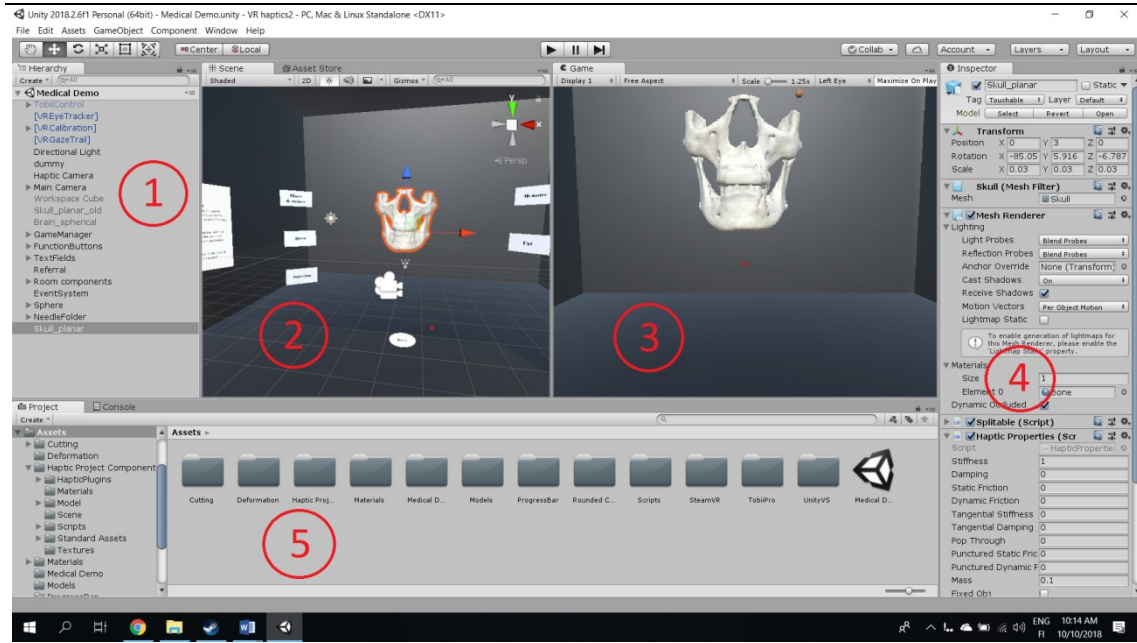
Jos jo 3D-mallinnusohjelmat hidastuvat huomattavasti liian ison tiedoston käsittelystä, niin erityisen tärkeää mallin yksinkertaistaminen on haptista palautetta käytettäessä. Voimapalautealgoritmin on päivitettävä käyttäjän liikuttaman kosketuspisteen sijainti vähintään 1000 kertaa sekunnissa ja verrattava sitä mallin pintaan, jotta palaute luodaan oikealla hetkellä. Monimutkaisen mallin pintojen tarkastelu koko ajan käynnissä olevassa silmukassa on liian paljon resursseja vievää, ja simulaation toiminnan hidastuminen tai jopa täydellinen toimimattomuus todennäköistä. Haptinen laite itsessäänkin hyötyy sileämmästä yksinkertaistetusta pinnasta, sillä pienet reiät ja epätasaisuudet aiheuttavat helposti ylimääräistä tärinää tai jopa kiinni tarttumista. Srinivasan ja Basdogan [1997] kiteyttävät, että tärkeintä on löytää optimaalinen tasapaino mallin monimutkaisuuden sekä haptisen palautteen realistisuuden välille tietokoneen kapasiteetti huomioon ottaen.

5.2 Unity-kehitysympäristö

Simulaatio toteutettiin käyttäen Unity:ä, joka on Unity Technologiesin kehittämä *pelimoottori* (game engine) eli kehitysympäristö 2D- ja 3D-peleille sekä simulaatioille. Jopa puolet maailman tietokonepeleistä on kehitetty sen avulla [Unity Technologies 2018a]. Yksi Unityn hyödyistä on, että se mahdollistaa saman lähdekoodin käyttämisen monella eri alustalla, ja toteutettu peli tai simulaatio voidaan siis kääntää vaikkapa Windows-, OSX- sekä Linux- käyttöjärjestelmille, erilaisille mobiililaitteille sekä pelikonsoleille muutamalla napinpainalluksella. Unityssä ohjelmointiin voi käyttää joko C#- (englanninkielinen lausunta: C sharp) tai UnityScript-kieltä. Tämä simulaatio sekä myöhemmin esiteltävä testiympäristö koodattiin C#:lla.

Unityllä työskentely tapahtuu Unity-editorin graafisen käyttöliittymän kautta. Yksi projekti koostuu yhdestä tai useammasta *näkymästä* (scene), joihin kehittäjä lisää erilaisia objekteja. Objekteja ovat kaikki peliin lisätyt esineet ja asiat kameroista valoihin ja pelaajahahmosta esimerkiksi peliääniin. Objekteihin taas liitetään ominaisuuksia ja kooditiedostoja, jotka määrittelevät miten nämä objektit pelin tai simulaation eri tilanteissa käyttäytyvät.

Unity-editorin käyttöliittymä on esitetty kuvassa 17, ja tärkeimmät käyttöliittymän elementit on osoitettu numeroilla. Paikassa 1 on objektihierarkiaikkuna, joka sisältää kaikki näkymään lisätyt objektit ja niiden suhteet toisiinsa. Paikat 2 ja 3 ovat Scene-ikkuna ja Game-ikkuna, jotka molemmat kuvastavat kehitettävää näkymää, mutta Scene-ikkunassa pelin objekteja voi siirtää ja muokata visuaalisesti, kun taas Game-ikkunassa peli näytetään sellaisena kuin loppukäyttäjä sen tulee oikeasti näkemään ja kokemaan. Paikalla 4 on Inspector-ikkuna, jonka kautta tarkastellaan peliobjektien ominaisuuksia. Jokaisella objektilla on automaattisesti esimerkiksi nimi, sijainti, kierto- sekä koko-ominaisuudet, mutta objektista ja sen tarkoituksesta riippuen muut ominaisuudet voivat vaihdella huomattavasti. Ominaisuus voi olla objektia komentava kooditiedosto, mutta myös vaikkapa uusi pintamateriaali tai painovoiman käyttö (tippuuko objekti alaspäin vai leijuuko ilmassa) säätelevä komponentti. Viimeisessä paikassa 5 on projekti-ikkuna, jossa esitetään kaikki projektiin liitetyt materiaalit (assets). Materiaali voi olla mikä tahansa Unityn kanssa yhteensopiva media tai tiedosto (esim. 3D-malli, äänitiedosto tai kuva) [Unity Technologies 2018b].



Kuva 17. Unity-editori ja sen tärkeimmät elementit. 1: objektihierarkiaikkuna, 2: Scene-ikkuna, 3: Game-ikkuna, 4: Inspector-ikkuna ja 5: projekti-ikkuna.

Unityn graafisen käyttöliittymän ansiosta sen opettelu ja käyttö on suhteellisen helppoa ja nopeaa, mutta pelikehitystä voi tehostaa myös Unityn ylläpitämän *Asset Store*n eli lisäosien ja valmiskomponenttien verkkokaupan avulla. Asset storesta voi ladata ilmaiseksi tai ostaa toisten tekemiä Unityn kanssa yhteensopivia 3D-malleja, kuvia, materiaaleja, ohjelmakoodia ja jopa valmiita projekteja, tutoriaaleja ja editorin lisäosia [Unity Technologies 2018c]. Verkkokaupan valikoima on todella kattava, ja osa tuotteista on itse Unity Technologies-yhtiön käsialaa.

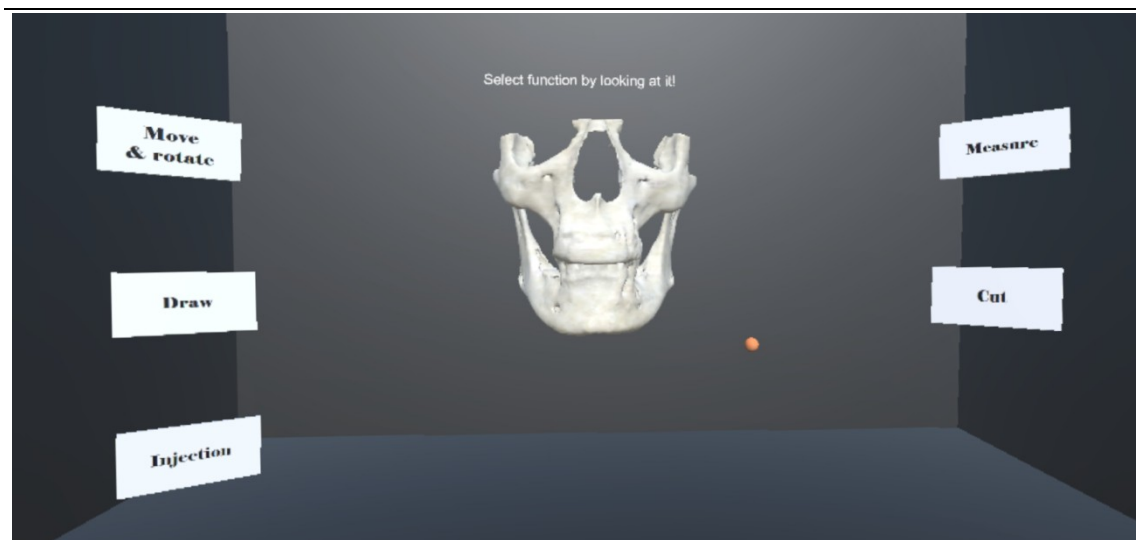
Myös tässä simulaatiossa ja myöhemmin esiteltävässä testiympäristössä hyödynnettiin Asset storen valikoimaa. Tärkein käytetty lisäosa oli nimeltään "Unity 5 Haptic Plugin for Geomagic OpenHaptics 3.3 (HLAPI/HD API)", lyhemmin "Haptic Plug-in for Unity", joka on C++-ohjelmointikielellä toteutettu liitännäinen, joka mahdollistaa yksinkertaisen haptisen vuorovaikutuksen kehittämisen Unityssä käyttäen C#-kieltä [Poyade *et al.* 2014]. Tämän lisäosan sisältämiä esimerkkitoimintoja hyödynnettiin mm. simulaation piirtotoimintoa koodatessa. Muita käytettyjä lisäosia olivat Tobii nettisivuilta ladattu Tobii Pro SDK (Software Development Kit) katseenseuranta varten [Tobii AB 2018] sekä Danni Schou:n kehittämä "MeshSplitting" [Schou 2012], jota muokkaamalla myöhemmin esiteltävä leikkaustoiminto toteutettiin.

5.3 Kehitetyt toiminnot

Simulaation toimintojen kehittäminen alkoi lääkärrien tapaamisella ja toiminnallisuuksien ideoimisella. Tarkoituksena ei ollut vielä tehdä valmista sairaalaan käyttöön tulevaa ohjelmistoa, vaan suunnitella ja testata erilaisia vuorovaikutustapoja ja käyttömahdollisuuksia proof-of-concept -tyylisen demonstraation kautta. Vaatimuksena oli tuottaa aidosta kuvantamisdatasta virtuaalitodellisuudessa tarkasteltava ja haptisesti tunnisteltavissa ja jollain tapaa käsiteltävissä oleva malli. Tuotettu simulaatio kävi kesän aikana läpi monia vaiheita ja muutoksia. Seuraavaksi siitä esitellään tarkemmin sen viimeisin versio.

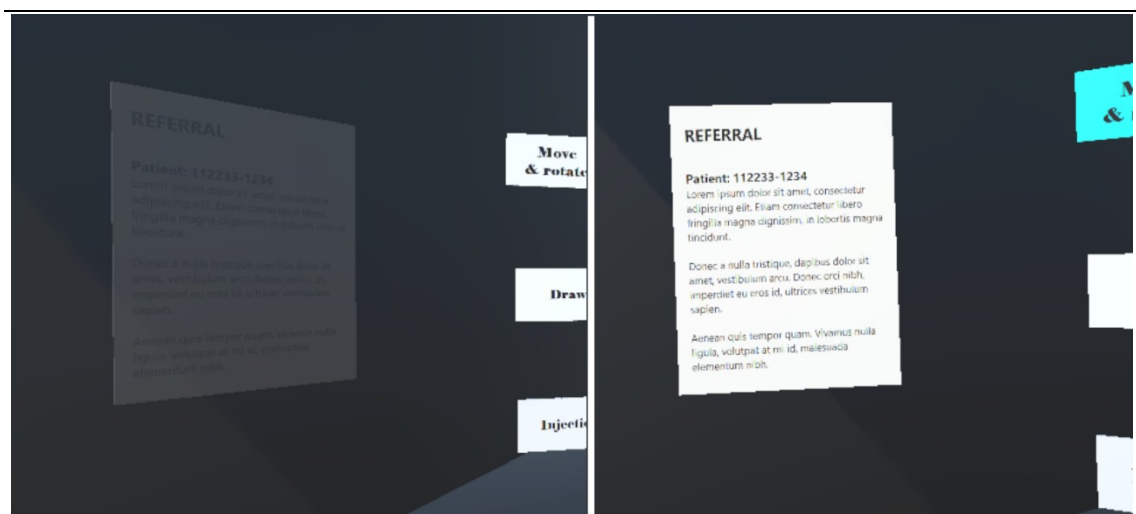
Simulaatiota käytetään normaalin tietokoneen avulla Unity-ohjelmistolla, mutta käyttäjä näkee simulaation virtuaalilasien kautta kolmiulotteisena. Vuorovaikutus tapahtuu katseen sekä haptisen voimapalautelaitteen avulla. Katseenseurannan toimivuuden ja hyvän tarkkuuden takaamiseksi simulaation aluksi täytyy aina suorittaa n. 10 sekuntia kestävä katsekalibraatio, jossa käyttäjän ainoa tehtävä on seurata punaista palloa näytöllä. Katseenseurantalaite on integroitu käytettyjen virtuaalitodellisuuslasien sisälle, eikä siitä aiheudu minikäänlaista epämukavuutta tai hankaluutta käyttäjälle.

Kuvassa 18 on esitetty simulaation alkutilanne. Käyttäjä on tumman huoneen sisällä, ja näkee suoraan edessään pääkallo-3D-mallin. Huoneen reunoilla on ilmassa leijuvia painikkeita. Vaaleanruskea pienehkö pallo kuvastaa haptisen laitteen kosketuspistettä ja liikkuu virtuaaliympäristössä oikean laitteen sijaintia seuraten. Käyttäjä voi nyt haptisen laitteen avulla tunnistella mallin pintaa.



Kuva 18. Simulaation aloitusnäkymä, mikään toiminto ei ole valittuna.

Kuvassa 19 esitetään huoneen vasemmalla seinustalla oleva ilmassa leijuva tekstielementti. Tällaisten tekstielementtien avulla virtuaalimaailmaan saadaan esimerkiksi potilaan lähetetiedot näkyville. Tekstielementti on normaalitilassa lähes läpinäkyvä, mutta kun käyttäjä suuntaa siihen katseensa, muuttuu se värilliseksi ja hyvin luettavaksi. Kun katse siirretään jälleen muualle, muuttuu teksti taas läpinäkyvämmäksi. Tällaisia tekstielementtejä voisi oikeassa soveluksessa olla enemmänkin, eikä ne läpinäkyvänä ainakaan häiritsisi oikeaa työskentelyä. Toinen vaihtoehto olisi lisätä virtuaalimaailmaan liukusäätimiä, joiden avulla tekstielementtien näkyvyyden voisi säätää haluamalleen tasolle.



Kuva 19. Tekstielementti esimerkiksi lähetetietoja varten.

Simulaatiossa on 5 eri toimintotilaa, jotka ovat suomennettuina mallin siirtäminen ja kääntäminen, mallin pinnalle piirtäminen, neulalla pistäminen, mittaaminen sekä leikkaaminen. Vain yksi tila voi olla kerrallaan valittuna, ja valinta tehdään katseen avulla. Käyttäjän tarvitsee ainoastaan katsoa haluamaansa painiketta, jolloin painikkeen eteen ilmestyy latausikoni. Ikoni alkaa saman tien täyttyä (esitetty kuvassa 20), ja jos käyttäjä pitää katseensa painikkeessa kunnes ikoni on täynnä (n. kahden sekunnin ajan), tulee painike valituksi ja vaihtaa värinsä siniseksi. Jos käyttäjä siirtää katseensa pois ennen ikonin täyttymistä, ikoni katoaa ja edellinen painike pysyy valittuna.

Jokaiseen toimintatilaan liittyy myös Reset-toiminto (painike oikealla kuvassa 20), jonka avulla käyttäjä voi nollata tekemänsä muutokset takaisin alkutilanteeseen. Reset-painikkeen toiminta riippuu siitä, mikä toimintotila on valittuna. Liikuttelutoiminnossa tämä tarkoittaa mallin sijainnin palauttamista lähtötilanteeseen, piirtotoiminnossa piirrettyjen alueiden hävittämistä, mittaustoiminnossa mittapisteiden hävittämistä, leikkaustoiminnossa mallin eheyttämistä ja pistotoiminnossa pistoskohtiin jäävien "reikien" (harmaiden pienien varjo-

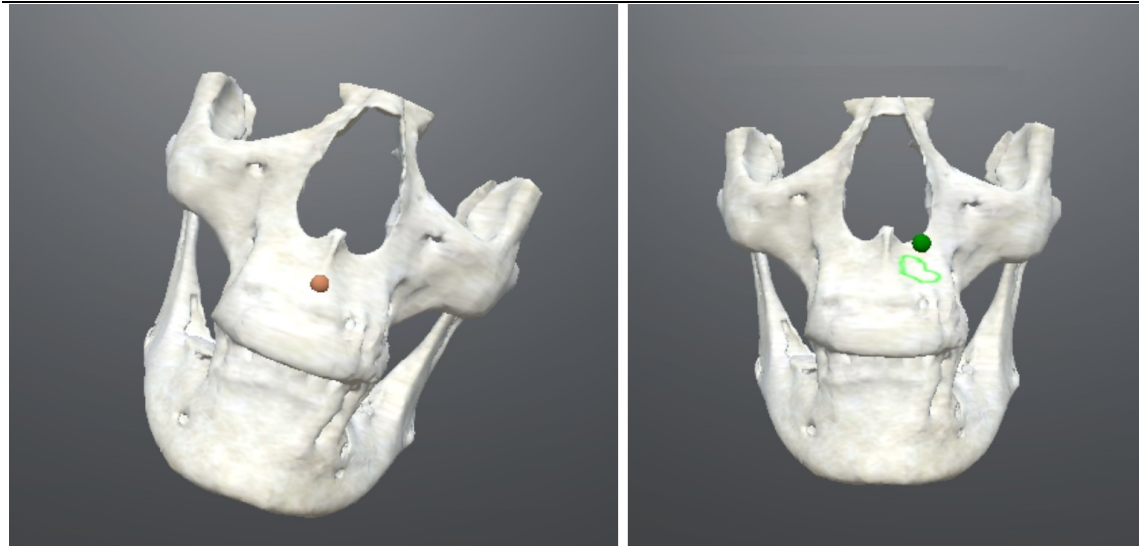
alueiden) hävittämistä. Reset-painike löytyy kallon alapuolelta ja sekin toimii katseen ja latausikonin avulla.



Kuva 20. Vasemmalla toiminnon valinta katseella. Draw-painike valittuna, mutta käyttäjä on juuri valitsemassa Move & rotate-painiketta. Oikealla Reset-painike.

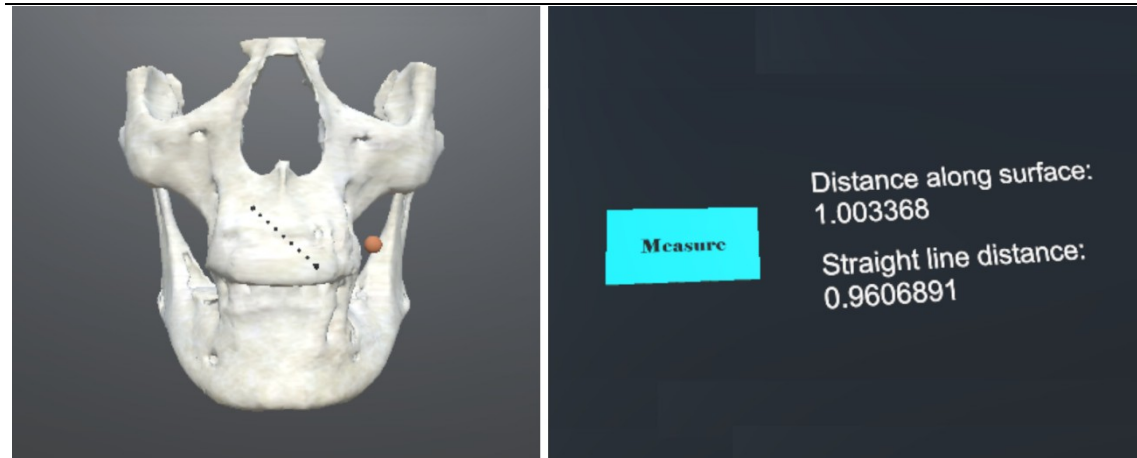
Ensimmäinen esiteltävä toiminto on objektin liikuttelu ja kääntäminen. Tässä tilassa käyttäjä pystyy haptisen laitteen avulla sekä tunnustelemaan objektin pintaa, että liikuttamaan sitä. Objektista otetaan kiinni, kun käyttäjä koskee objektia virtuaalimaailmassa ja painaa haptisen laitteen ainoaa painiketta (objektin liikuttaminen esitetään vasemmalla kuvassa 21). Tällöin objekti seuraa haptisen laitteen sijaintia sekä kiertoa. Objekti seuraa sitä niin kauan, kunnes painike vapautetaan, jolloin se jää paikoilleen siihen sijaintiin, jossa vapautus tehtiin. Objektin voi palauttaa alkusijaintiin Reset-painikkeen avulla.

Seuraava toiminto on objektin pinnalle piirtäminen (oikealla kuvassa 21). Piirto suoritetaan kuljettamalla haptisen laitteen kosketuspisteellä objektin pinnalla, ja näin lääkäri voisi esimerkiksi suunnitella leikkauslinjoja tai ympyröitä operaatiota vaativan alueen. Kynän väriä voi kontrolloida painamalla laitteen painikkeesta. Värivaihtoehtoja on yhteensä 7, ja viimeisen värin jälkeen palataan automaattisesti ensimmäiseen. Piirtojäljet voi poistaa katsomalla Reset-painiketta.



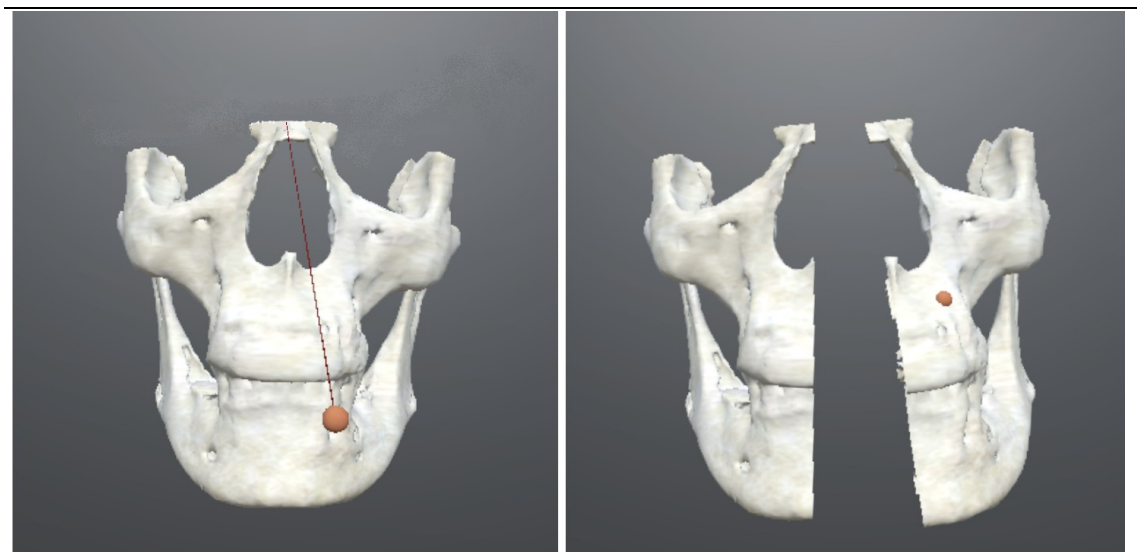
Kuva 21. Vasemmalla objektin liikuttelu ja kiertäminen, oikealla pinnalle piirtäminen.

Kolmas esiteltävä toiminto on mittaaminen (kuvassa 22). Käyttäjä voi aloittaa mittaamisen mistä tahansa kohtaa objektin pintaa viemällä kosketuspisteen tähän kohtaan ja painamalla laitteen painikkeesta. Tähän sijaintiin muodostuu musta pieni pallo. Käyttäjä tekee seuraavan mittapisteen samalla tavalla, jolloin näiden kahden mustan pisteen välille muodostetaan vielä pienempien pisteiden jono. Mittaamista voi jatkaa tekemällä uusia mittapisteitä niin pitkälle kuin haluaa. Etäisyysinformaatio esitetään käyttäjälle Measure-painikkeen oikealla puolella, ja luvut kuvastavat aina etäisyyttä alkupisteestä kaikista viimeisimpään pisteeseen. Luvut ovat tällä hetkellä Unityn omina yksikköinä, eivätkä suoraan kuvasta senttejä tai metrejä. Oikeiksi mittayksiköiksi muuttaminen olisi mahdollista, mutta sitä ei tähän versioon toteutettu. Ylempi luku kuvastaa mitattua matkaa objektin pintaa pitkin mitattuna ja ottaa huomioon pinnan kolmiulotteisen muodon, ja alempi luku taas kuvastaa tarkkaa etäisyyttä mittapisteiden välillä huolimatta siitä, että linja menee välillä esimerkiksi mallin sisälle. Tämän avulla voi kuitenkin mitata esimerkiksi koko kallon tai yksittäisen luun kohdan leveyden.



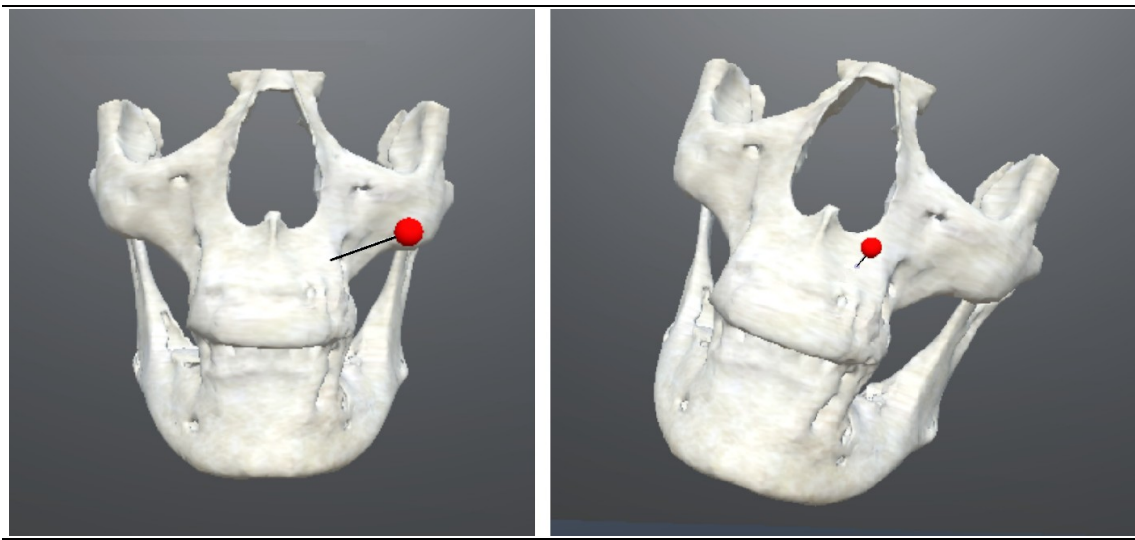
Kuva 22. Mittaustyökalu ja mitattu etäisyys.

Seuraava toiminto on objektin leikkaus (kuvassa 23). Käyttäjä määrittelee leikkauslinjan kahdella painalluksella objektin pinnalla. Ensimmäisen painalluksen jälkeen alkupisteen ja haptisen laitteen kosketuspisteen välille muodostetaan "lanka", jonka avulla leikkauslinja voidaan hahmottaa paremmin. Käyttäjä suorittaa leikkauksen toisella painalluksella, jolloin lanka häviää. Tämä on ainoa visuaalinen palaute leikkauksen onnistumisesta, ja käyttäjä voi nyt siirtää objektin molempia puoliskoja omina yksilöinä. Leikkauksia voidaan jatkaa ja halkaista kallon toinen puolisko vielä kahtia. Leikkaustyökalu on projektin aikarajoista johtuen melko yksinkertainen, sillä leikkauslinja on aina suora ja halkaisee objektin koko pituudeltaan tai leveydeltään leikkaussuunnasta riippuen. Tämän toiminnon kehitysehdotuksia esitetään luvun viimeisessä osiossa.



Kuva 23. Leikkaustyökalu.

Viimeinen toiminto on pistostyökalu (kuvassa 24). Tässä toiminnossa tuttuun kosketuspisteeseen lisätään neulan piikki, jolla käyttäjä voi pistää objektia ja tuntea kuinka neula uppoaa objektiin. Pistokseen liittyviä parametreja, esimerkiksi objektin pinnan läpäisyyn sekä sen sisällä liikkumiseen tarvittavaa voimaa voidaan säätää. Lääketieteessä on paljon toimenpiteitä, joihin liittyy neulalla pistäminen. Yleisesti neulalla läpäistään pehmytkudoksia esimerkiksi rokotusta annettaessa tai verikoetta otettaessa, mutta tässä simulaatiossa päätettiin silti yksinkertaisuuden vuoksi käyttää jo tutuksi tullutta luumallia pistostyökalun simuloimiseen, vaikkei se reaalielämän tilannetta vastaakaan.



Kuva 24. Pistostyökalu.

Kuten aiemmin jo todettiin, oli simulaation työstäminen iteratiivinen oppimisprosessi, ja edellä esitelty versio ehti kokea monia muutoksia. Jo alusta asti toiminnot valittiin painikkeita käyttäen, mutta ensimmäisissä versioissa valinta tehtiin koskettamalla painikkeita haptisen laitteen kosketuspisteellä. Myöhemmin siirryttiin katseohjauksen käyttöön, kun toimintojen määrä kasvoi ja painikkeet haluttiin sijoittaa hieman kauemmas mallista visuaalisista syistä. Painikkeiden koskeminen alkoi olla tällöin liian vaivalloista haptisen laitteen rajallisesta liikealueesta johtuen, ja katseohjauksen todettiin olevan tähän ympäristöön sopivampi, helpompi ja nopeampi vuorovaikutustapa. Katseohjauksen viivettä säädettiin useampaankin kertaan, jotta valinta tapahtui tarpeeksi nopeasti, mutta käyttäjä ei kuitenkaan tehnyt virheellisiä valintoja painikkeita vilkaistessaan. Myös Reset-painike lisättiin simulaatioon vasta sitten, kun toimintojakin oli kehitetty useampia. Tämä paransi simulaation käytettävyyttä, sillä aiemmin simulaatio pysäytettiin ja käynnistettiin uudestaan alkutilanteeseen palaamista varten. Tumma huone mallin ympärille lisättiin myös melko loppuvaiheessa. Aiemmin malli leijui ”taivaalla” vaaleassa laajassa ympäristös-

sä, ja huoneen lisäys sekä paransi vaalean mallin näkyvyyttä, että toisaalta rajasi käyttäjän huomiota pienemmälle alueelle suoraan malliin ja painikkeisiin.

5.4 Jatkoideat

Simulaation tarkoitus oli testata erilaisia vuorovaikutustapoja ja tuottaa kokeiltavissa oleva ympäristö hankeidean esittelemiseen ja myöhemmän ideoinnin tueksi. Kyseessä ei ole valmis ohjelmisto, ja siksi kehitysmahdollisuuksia on melkeinpä loputtomasti.

Jatkoideat voidaan jakaa nykyisten toimintojen kehittämiseen ja täysiin uusiin toiminnallisuuksiin. Esimerkiksi nykyisessä leikkaustyökalussa on paljon kehitettävää, sillä tällä hetkellä mallia voidaan leikata vain suorien linjojen avulla. Vapaamuotoinen leikkauslinja mahdollistaisi todennäköisemmän leikkaussuunnittelun, mutta tällaisen toteuttaminen olisi ollut liian työlästä valmisteluprojektin aikana. Jokaiseen toiminnallisuuteen liittyvä Reset-painike voitaisiin korvata jollakin hienovaraisemmalla ratkaisulla, esimerkiksi tuomalla kumitustoiminto piirtotoiminnon rinnalle. Tällöin kaikkia piirrettyjä alueita ei tarvitsisi poistaa samalla kertaa. Mittaustyökalussa taas voitaisiin sallia yksittäisten mittapisteiden poisto tai tehdä niiden uudelleenliikuttaminen mahdolliseksi.

Täysin uusia toiminnallisuuksia olisivat erilaisten valmiiden 2D-muotojen (ympyrä, suora viiva) piirtäminen ja 3D-objektien (pallo, levy, ruuvi) lisääminen mallin pinnalle tai osittain sen sisälle leikkaussuunnittelua ajatellen, tekstiä sisältävien muistilappujen tuottaminen simulaation sisällä esimerkiksi puheentunnistusta hyödyntäen ja simulaation avulla muokatun 3D-mallin tallentaminen uutena .obj-tiedostona piirtojälkineen ja leikattuine alueineen myöhemmää käsittelyä varten. Iso alue on myös tekoälyn hyödyntäminen esimerkiksi anatomisten ja patologisten alueiden tunnistuksessa, mutta tällaiseen vaaditaan jo aiheen asiantuntijaosaamista ja paljon suurempi projektitiimi. Simulaatiota voitaisiin myös käyttää esimerkiksi kahdella haptisella laitteella, jolloin työskentely tapahtuisi kahden kosketuspisteen avulla ja tekisi simulaatiosta jälleen todennäköisemmän. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää myös virtuaalitodellisuusohjainta ja nykyistä yhtä haptista laitetta.

6 Kokeellinen tutkimus

6.1 Tutkimusidea

Tämän pro gradu -tutkielman kokeellisessa tutkimusosuudessa vertailen kolmea eri laitetta, ja niiden sopivuutta 3D-objektien käsittelyyn ja tarkkuutta vaativan merkkaustehtävän suorittamiseen. Vertailtavat laitteet ovat normaali tietokoneen hiiri, jota käytetään normaalin 2D-näytön kanssa, vapaasti kolmiulotteisesti ilmassa liikuteltava haptista värinäpalautetta tuottava VR-ohjain, jota käytetään VR-lasien kanssa, sekä haptista voimapalautetta tuottava kolmiulotteisesti mutta rajoitetusti liikuteltava voimapalautelaite, jota myös käytetään VR-lasien kanssa. Tutkimuksessa käyttäjät suorittivat sarjat samanlaisia tehtäviä jokaisella laitteella, ja analysoin tutkimuksen aikana kerättyä dataa sekä subjektiivisia mielipiteitä laitteiden hyötyjen ja haittojen tunnistamiseksi.

Tutkimusidea syntyi kesän 2018 aikana, kun tutustuin Tampereen yliopiston Digital and Physical Immersion in Radiology and Surgery -projektin parissa muutamaaan lääketieteeseen liittyvään virtuaalitodellisuussovellukseen, joita käytettiin VR-ohjaimen avulla. Luvussa 5 esitellyssä itse kehittämässäni simulaatiossa taas käytettiin objektien käsittelyyn pelkkää voimapalautelaitetta. Sekä voimapalautelaite että VR-ohjain edustavat uutta teknologiaa ja vuorovaikutusmahdollisuuksia verrattuna perinteiseen 2D-näyttöön ja hiireen, joka on esimerkiksi juuri radiologian alalla vielä vallassa oleva työväline kolmiulotteisten objektien käsittelyssä leikkaussuunnitteluun liittyen. Merkkaustehtävä valittiin, koska sen avulla voidaan analysoida laitteiden tarkkuutta, ja koska myös oikeassa radiologisessa leikkaussuunnitteluprosessissa (kefalometrisessä analyysissa) hyödynnetään anatomisten pisteiden merkkausta. Tässä tutkimuksessa osallistujilta ei vaadittu anatomian tuntemusta, joten merkkaukseen ei voitu käyttää standardoituja anatomisia pisteitä ilman visuaalista vihjettä. Alkuperäiset pisteet luotiin mallien pinnalle itse valittuihin paikkoihin ja ne esitettiin käyttäjälle selkeällä punaisella värillä.

Tutkimuksen tarkoituksena on vertailla näitä kolmea syötelaitetta keskenään, ja tämän avulla saada tietoa eri laitteiden hyödyistä ja haasteista koskien 3D-objektien käsittelyä ja merkkauksien tekemisestä. Tieto on hyödyllistä tulevaisuudessa uusia sovelluksia ja niiden vuorovaikutustapoja suunniteltaessa. Yhteenveto laitteista ja niiden ominaisuuksista on esitetty taulukossa 3. Tutkimuksessa käytetyt VR-lasit ja VR-ohjain kuuluvat tämän työn luvussa 2.2 esiteltyyn HTC Vive -VR-järjestelmään, ja voimapalautelaitteena käytettiin luvussa 3.4 esiteltyä Geomagic Touch X:ää.

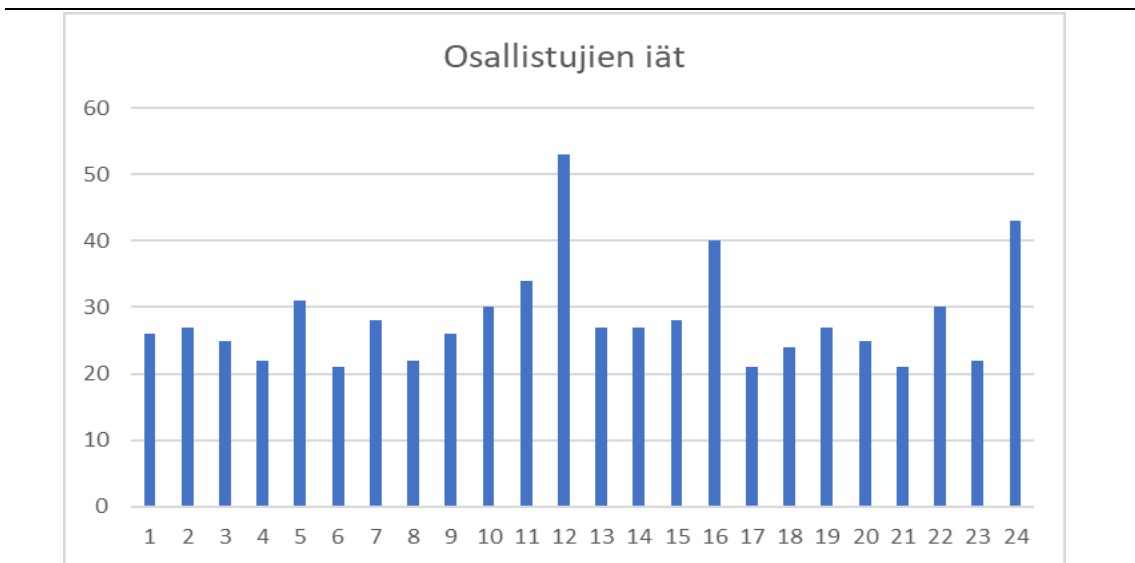
| Laite | Visuaalinen palaute | Haptinen palaute | Liike |
|--------------|----------------------|------------------|-----------------|
| Hiiri | 2D (normaali näyttö) | Ei mitään | (Rajoitettu) 2D |
| VR-ohjain | 3D (VR-lasit) | Väriäpalaute | Vapaa 3D |
| Voimapalaute | 3D (VR-lasit) | Voimapalaute | Rajoitettu 3D |

Taulukko 3. Yhteenveto menetelmien ominaisuuksista.

Tutkimuksen käytännön osuus eli käyttäjätestit suoritettiin lokakuussa 2018 puoleksi toisen tutkijan kanssa, ja sen tulokset tullaan julkaisemaan myös "Evaluation of Haptic Virtual Reality User Interfaces for Medical Marking on 3D Models" -nimisessä artikkelissa. Artikkelin kirjoittajat ovat Zhenxing Li, Maria Kiiveri, Jussi Rantala ja Roope Raisamo, ja se on lähetetty arvioitavaksi IJHCS-lehteen (The International Journal of Human-Computer Studies).

6.2 Osallistajat käyttäjätestiin

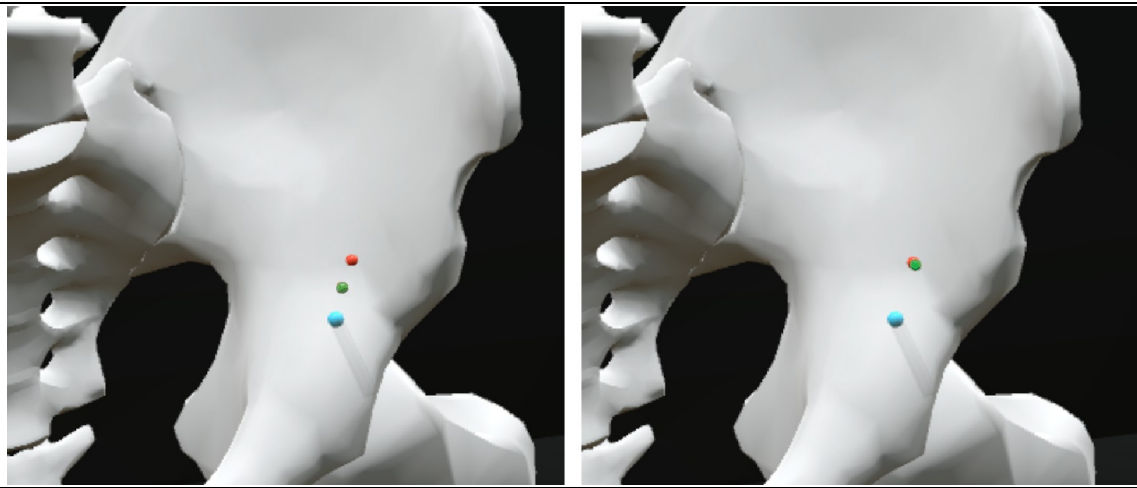
Tutkimukseen osallistui 24 opiskelijaa Tampereen yliopistosta. Opiskelijoiden iät vaihtelivat 21-53 vuoden välillä (esitetty kaaviossa 1). Tyypillisin ikä eli tämän lukujoukon moodi oli 27 vuotta, ja keskiarvo 28 vuotta. Naisten osuus oli 37,5% (9 kpl) ja miesten 62,5% (15 kpl), eikä kukaan osallistujalla ollut merkittävä aiempaa kokemusta haptisen laitteen tai VR-ohjaimen käytöstä tällaisessa tarkkuutta vaativassa tehtävässä. Yksi osallistujista oli vasenkätinen, mutta tällä ei testin kannalta ollut merkitystä. Osallistujat pyydettiin tutkimukseen sähköpostilistoille lähetetyn kutsun avulla.



Kaavio 1. Osallistujien iät. Pystyakselilla vuodet, vaaka-akselilla osallistuja-ID.

6.3 Tutkimuksen kulku

Tutkimuksessa käyttäjän tehtävänä oli etsiä *merkkausepisteitä* 3D-objektien pinnoilta, ja tehdä omat merkit näiden päälle mahdollisimman tarkasti samoihin kohtiin. Alkuperäiset pisteet löytääkseen käyttäjän oli pakko käännellä, loitontaa ja lähentää objekteja. Kuvassa 25 esitetään punaisella alkuperäinen merkkausepiste ja vihreällä käyttäjän tekemä uusi merkki, ja havainnollistetaan huonon ja hyvän suorituksen eroa. Parhaassa tapauksessa käyttäjän tekemä merkki peittää alkuperäisen merkkausepisteen kokonaan. Sininen pallo ja siihen yhdistyvä läpinäkyvä puikko kuvassa 25 kuvastavat virtuaaliohjaimen sekä haptisen laitteen virtuaalista esitystä. Hiirtä käytettäessä käyttäjä näki luonnollisesti kursorin 2D-näytössä.

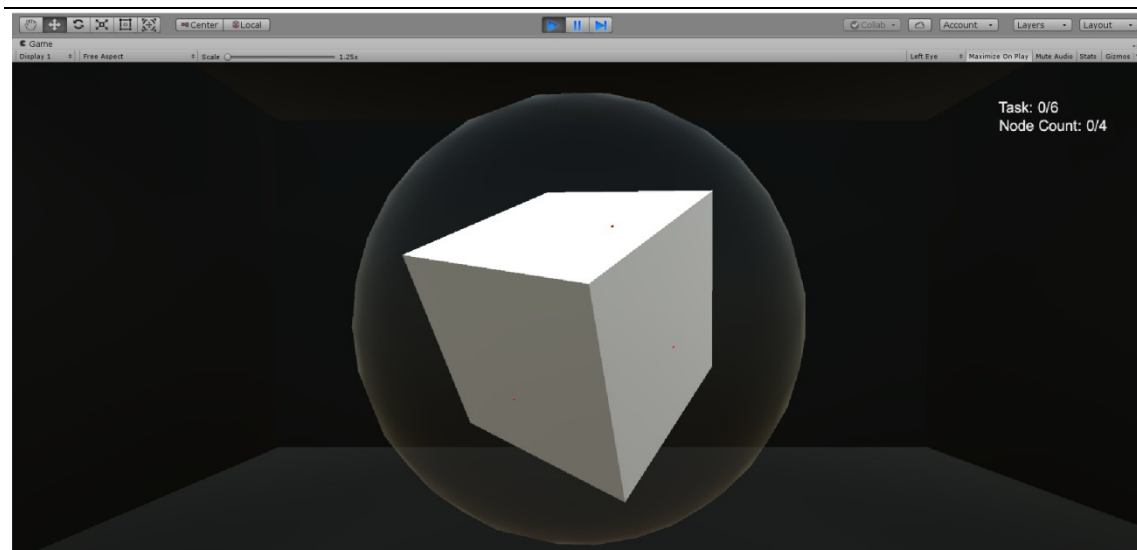


Kuva 25. Vasemmalla huonosti onnistunut merkkausepiste ja oikealla melko hyvin onnistunut merkkausepiste.

Erilaisia kolmiulotteisia objekteja oli yhteensä kolme; aivot, rintakehän alueen luut sekä lantion alueen luut. Anatomisia alueita käytettiin, koska myös tutkimusidea syntyi radiologiaan tai ylipäättään lääketieteeseen liittyvistä sovelluksista ja niiden käytöstä. 3D-mallit on esitetty kuvassa 26. Tein aivomallin itse potilasdatasta, mutta latusin rintakehän ja lantion mallit ilmaisia 3D-malleja tarjoavalta sivustolta www.free3D.com/3d-models. Ennen varsinaista testisuoritusta käyttäjän annettiin harjoitella 3D-mallin kääntelyä ja merkkausepisteiden merkkausepisteiden harjoitteluun tarkoitettua kuution avulla, joka on esitetty kuvassa 27.

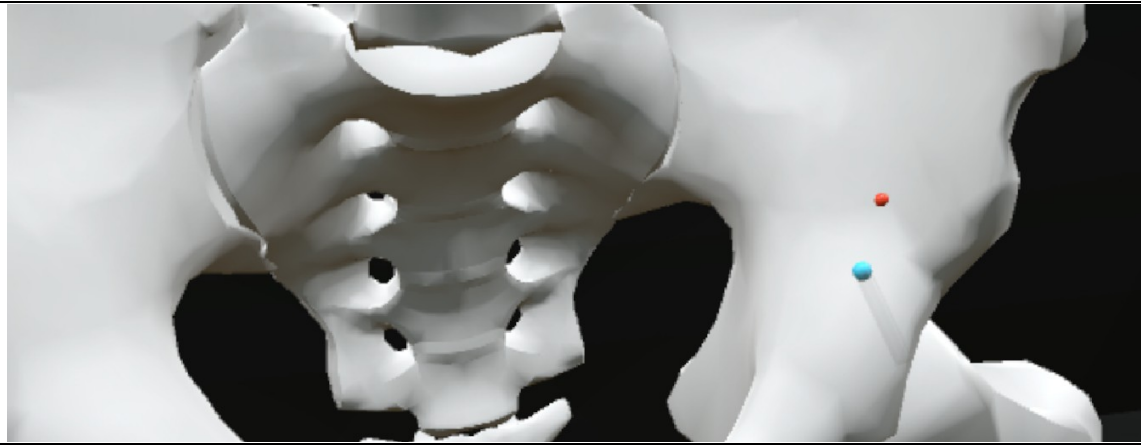


Kuva 26. Tutkimuksessa käytetyt 3D-mallit.

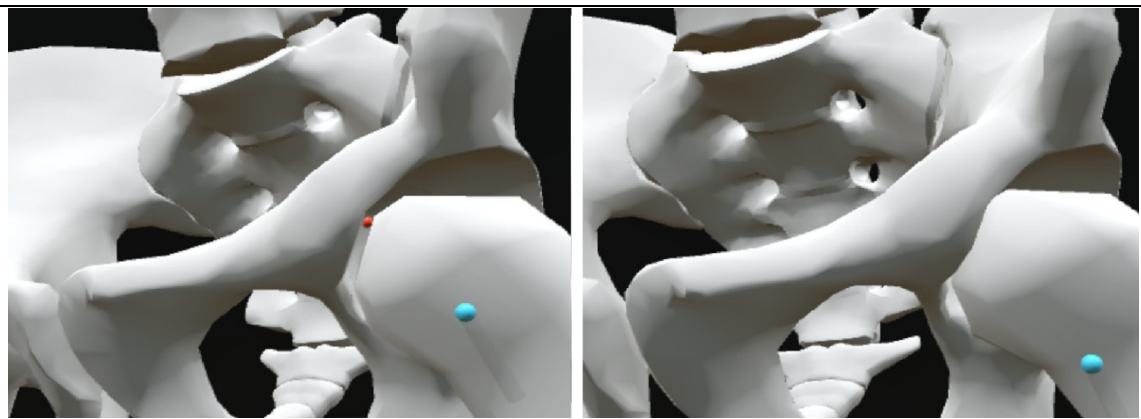


Kuva 27. Harjoittelumalli ja testinäkymä.

Merkkauspisteiden sijainnit jaettiin kahteen kategoriaan: helppoihin ja vaikeisiin sijainteihin. Helppo sijainti tarkoittaa, että piste on nähtävillä monesta eri katselukulmasta, ja sijaitsi esimerkiksi suoraan näkyvillä lantiomallin suoliin päällä (kuvassa 28). Vaikea kategoria tarkoittaa, että merkkapiste näkyi vain pienehköstä tietyistä katselukulmasta, ja sijaitsi esimerkiksi reisiluun nupin ja lonkkamaljan kuopan välisessä tilassa (kuvassa 29). Helpon sijainnin piste on siis helppo sekä löytää että merkata, ja vaikean sijainnin piste vastaavasti haastavampi kummassakin osiossa, ja vaati useimmiten enemmän mallin kääntelyä. Tutkimuksessa käyttäjät suorittivat jokaisesta kolmesta mallista sekä helpon että vaikean tason, ja yhtä tasoa kohti mallin pinnalla oli aina 4 merkkapistettä. Yhteensä siis 3 mallia \times 2 eri tasoa per malli \times 4 merkkapistettä jokaisella tasolla, eli yhteensä 24 merkkapistettä jokaisella laitteella. Koko tutkimuksessa jokainen käyttäjä teki näin 72 merkkapistettä yhteensä 3 eri laitteella.



Kuva 28. Helppo sijainti lantiomallissa.



Kuva 29. Vaikea sijainti lantiomallissa, merkkapiste on näkyvissä vain pienestä katselukulmasta.

Tutkimuksessa 3D-mallien järjestys (rintakehä, lantio ja aivot) sekä merkkapisteiden sijainnit satunnaistettiin itse sovelluksessa, ja vaikeustason järjestys (helpot ensin, vaikeat ensin) sekä vertailtujen menetelmien käyttöjärjestys (hiiri, VR-ohjain, haptinen laite) otettiin huomioon ja järjestystä vaihdettiin jokaisen käyttäjän jälkeen siten, että jokainen järjestys suoritettiin yhtä monta kertaa. Tutkimusjärjestykset jokaiselle 24:lle osallistujalle on esitetty taulukossa 4, jossa H tarkoittaa hiirtä, O tarkoittaa (VR-)ohjainta ja V tarkoittaa voimapalautelaitetta. Pieni h tarkoittaa helppoja ja pieni v vaikeita sijainteja, ja kukin osallistuja suoritti hänelle arvotulla järjestyksellä jokaiseen laitteeseen liittyvät tehtävät. Ensimmäisen käyttäjän suorittama järjestys oli taulukon mukaisesti Hiiri (helpot tasot [kolmesta eri 3D-objektista], vaikeat tasot [kolmesta eri 3D-objektista]), Ohjain (helpot tasot, vaikeat tasot), Voimapalautelaite (helpot tasot, vaikeat tasot).

| | | | |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| 1. H, O, V h, v | 7. H, O, V v, h | 13. H, O, V h, v | 19. H, O, V v, h |
| 2. H, V, O h, v | 8. H, V, O v, h | 14. H, V, O h, v | 20. H, V, O v, h |
| 3. O, H, V h, v | 9. O, H, V v, h | 15. O, H, V h, v | 21. O, H, V v, h |
| 4. O, V, H h, v | 10. O, V, H v, h | 16. O, V, H h, v | 22. O, V, H v, h |
| 5. V, H, O h, v | 11. V, H, O v, h | 17. V, H, O h, v | 23. V, H, O v, h |
| 6. V, O, H h, v | 12. V, O, H v, h | 18. V, O, H h, v | 24. V, O, H v, h |

Taulukko 4. Osallistujien suorittamat testijärjestykset. H = hiiri, V = voimapa-lautelaite, O = (VR-)Ohjain, ja kategoriat v = vaikea, h = helppo.

Tutkimuksen alussa käyttäjiä pyydettiin allekirjoittamaan sopimuslomake sekä taustatietokysely, ja heille kerrottiin tutkimuksen tarkoitus ja kulku. Jokai-sen kolmen laitteen jälkeen käyttäjää pyydettiin täyttämään kysymykset liittyen kyseiseen laitteeseen ja käyttäjän kokemuksiin. Tutkimukseen oli varattu aikaa 1 tunti jokaista käyttäjää kohden.

Tutkimuksen aikana tallennettiin automaattisesti tietoja käyttäjän suoriu-tumisesta. Tallennettavat tiedot olivat aikaleimat, joista selvisi käytetty aika lai-tekohtaisesti jokaista kuutta tehtäväosiota kohti (3 eri mallia ja jokaisessa 2 eri vaikeustasoa), etäisyys alkuperäisten ja käyttäjän tekemien merkkausempisteiden välillä, joista analysoitiin kuinka tarkasti jokaisella menetelmällä tehtävästä suoriuduttiin, sekä tieto milloin käyttäjä liikkui, käänteli tai hiiren tapauksessa zoomasi kohti mallia, jonka avulla voitiin laskea prosentuaaliset osuudet kääntelylle (eli aktiiviselle etsinnälle) sekä muuhun toimintaan (käytännössä merkkausempisteiden tekemiseen) kuluneelle ajalle.

6.4 Testiympäristöjen kuvaus ja toiminta

Tein testiympäristöt jokaiselle menetelmälle Unity:llä. Ympäristöjä piti olla kolme, jotta ohjelma tunnistisi eri syötekanavista (eri laitteista) tulleet käskyt, ja jotta tutkimuksessa kerätyt tiedot esimerkiksi mallin kääntelyyn käytetystä ajas-ta tallennettiin oikein.

Kuvassa 30 esitetään käyttötilanne jokaisen käytetyn laitteen kanssa. En-simmäisenä kuvassa esitetään käyttötilanne 2D-näytön ja hiiren avulla suorite-tusta osiosta. 3D-mallia käännettiin (rotate) hiiren vasemmalla näppäimellä ja liikutettiin (pan) oikealla näppäimellä. Hiiren rullasta käyttäjä pystyi zoomaa-maan lähemmäs mallia. Hiiren osoittimen tuli olla ison läpinäkyvän mallia ym-päröivän pallon sisäpuolella, jotta liikuttaminen ja kääntäminen onnistui. Uusi merkintäpallo hiiren cursorin osoittamaan kohtaan mallin pinnalle tehtiin va-semmalla kädellä näppäimistön välilyöntipainikkeesta. Pallon tekeminen ei onnistunut, mikäli hiiri ei ollut ollenkaan mallin päällä.

Toisen laitteen eli VR-ohjaimen käyttötilanne esitetään keskimmäisenä kuvassa 30. VR-laseilla malli näkyi käyttäjän edessä kolmiulotteisena, ja myös ohjainta liikuteltiin ilmassa kolmiulotteisesti. Mallista otettiin kiinni viemällä ohjan läpinäkyvän pallon sisälle (eli lähelle mallia) ja painamalla ohjaimen liipaisinpainiketta etusormella. Tällä tavoin käyttäjä käänteli ja veti mallia lähemmäs itseään, ja malli vapautettiin painamalla samaa näppäintä uudestaan. Käyttäjän koskettaessa mallin pintaa ohjaimella, alkoi ohjain täristä. Kyseessä oli siis tuntopalaute, joka on yksi haptisen palautteen muoto. Tärinä loppui, kun ohjain liikutettiin pois mallin kosketuksista. Palaute ei siis estänyt käyttäjää menemästä mallin sisälle. Merkintäpallo tehtiin välilyöntipainikkeella, ja se onnistui vain, kun ohjain tärisi eli oli kontaktissa objektiin. Käyttäjä saattoi silti tehdä merkinnän osittain mallin sisälle, sillä ohjainta on vaikea pitää täydellisesti paikoillaan ilmassa.

Viimeisen laitteen eli voimapalautelaitteen käyttötilanne esitetään viimeisenä kuvassa 30. Voimapalautelaitteen käyttö muistuttaa jossain määrin ohjaimen käyttöä, sillä molempia liikutetaan ilmassa. Käytettyä voimapalautelaite Touch X:ää kuitenkin rajoittaa laitteen ”käsivarren” pituus ja nivelet, mutta sen etuna on, että käyttäjä tuntee koskevasa virtuaaliobjektia eikä osoitin voi mennä objektin pinnan läpi. Merkintäpallo saadaan siis tämän laitteen avulla täsmälleen objektin pinnalle, mutta toki sijainnin tarkkuus riippuu silti käyttäjästä. Laitetta pidetään kädessä kuin kynää, ja sen peukalon kohdalla olevan ainoan painikkeen avulla objektista joko otettiin kiinni tai uudella painalluksella vapautettiin se. Liikuttamista varten virtuaaliosoitimen piti myös sijaita läpinäkyvän mallia ympäröivän pallon sisällä. Uudet merkintäpisteet tehtiin jälleen välilyöntipainikkeella, mutta ainoastaan mikäli kosketuspiste koski objektin pintaa. Näin, kuten ohjaimenkin kohdalla, saatiin estettyä vahingossa tapahtuneet merkintäpisteiden sijoitukset esimerkiksi ilmaan leijumaan.



Kuva 30. Käyttötilanteet hiiren, VR-ohjaimen sekä voimapalautelaitteen kanssa.

7 Tulokset

Tässä luvussa käsitellään tutkimuksen tulokset. Tulokset perustuvat 24 osallistujan dataan. Ensin käsitellään objektiiviset tulokset, ja sen jälkeen kyselylomakkeelta saadut subjektiiviset mielipiteet.

Laitteiden välisiä tuloksia ja erojen merkitsevyyksiä verrattiin keskenään Wilcoxon merkittyjen sijalukujen testillä, sillä otoskoko oli pieni (alle 30) eikä tarkasteltavat muuttujat olleet normaalijakautuneita perusjoukossa. Nämä molemmat ovat hyviä perusteita käyttää Wilcoxon testiä normaalin T-testin sijaan.

7.1 Objektiiviset tulokset kerätystä datasta

Ohjelma tallensi automaattisesti jokaisen käyttäjän tekemän merkkipisteen sekä sitä lähinnä olevan alkuperäisen pisteen välisen etäisyyden. Lähin alkuperäinen piste haettiin käyttämällä ohjelmakoodissa silmukkaa, joka vertasi käyttäjän tekemän pisteen etäisyyttä vuorotellen jokaiseen tehtävässä näkyvillä olevaan alkuperäiseen pisteeseen, ja valitsi niistä lopulta sen, johon etäisyys oli lyhyin. Näin ei tarvinnut rajoittaa missä järjestyksessä käyttäjä sai tehtävässä edetä, ja silti saatiin selville mitä pistettä käyttäjä kulloinkin merkkasi.

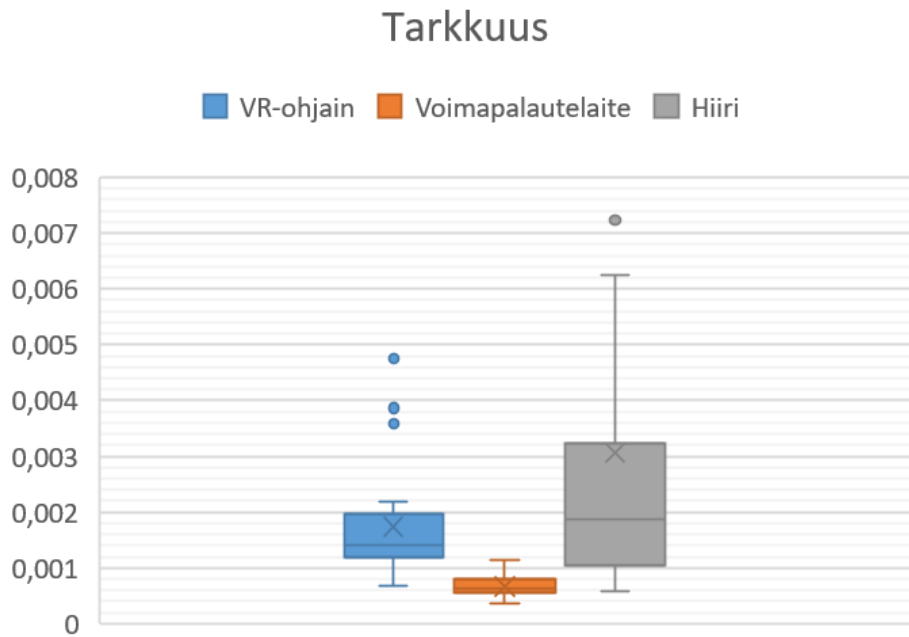
Helpon tason merkkausepisteissä tarkkuus oli hyvä sekä voimapalautelaitteen että hiiren kanssa. Hiiri soveltui kolmiulotteisen objektin kääntelyyn ja merkkauseeseen kohtalaisesti, kun merkkausepisteet olivat helposti löydettävissä paikoissa eikä itse objekti peittänyt merkkausepisteitä toisten osiensa taakse. VR-ohjaimen tarkkuus oli helpossa kategoriassa huonoin, sillä käden väsymys ja värinä aiheuttivat epätarkkuutta vaikka merkkausepisteiden sijainnit olivatkin helppoja. Vaikealla tasolla voimapalautelaite oli tarkin, ja sen kautta saatavasta pinnan tunnusta saatiin selkeästi hyötyä. Toisena vaikeassa kategoriassa oli VR-ohjain, ja huonoimpana selkeästi hiiri. Vaikean kategorian merkkausepisteet sijaitsivat useasi hankalissa kulmissa kolmiulotteisen objektin pinnalla, ja hiirellä niihin tarkasti osuminen oli selvästi vaikeaa.

Kaaviossa 2 on esitetty kaikkien laitteiden keskimääräiset tarkkuudet, eli alkuperäisten ja käyttäjän tekemien merkkipseiden sijaintien erotukset. Mitä pienempi luku on, sitä lähemmäs toisiaan käyttäjä onnistui pisteet tekemään. Etäisyydet käyttäjän tekemien ja alkuperäisten pisteiden välillä on laskettu käyttäen Unityn etäisyyksiä, eikä niitä ole muunneltu vastaamaan tosielämän yksiköitä, sillä tämä olisi pitänyt ottaa huomioon jo 3D-malleja ja niiden kokoja luodessa. Tässä kaaviossa helpot ja vaikeat kategoriat on yhdistetty, sillä oikeassa elämässä tällaista kahtiajakoa eri kategorioihin esimerkiksi leikkaussuunnittelua tehtäessä ei ole. Aiemmassa kappaleessa käsiteltiin helpon ja vaikean

tason tuloksia erikseen, mutta erityisen mielekästä on tarkastella laitteiden keskimääräistä tarkkuutta.

Tulokset osoittavat, että voimapalautelaite on tilastollisesti merkittävästi tarkempi kuin VR-ohjain (näitä kahta verrattaessa p-arvo 0) tai hiiri (näitä kahta verrattaessa p-arvo myös 0). Yleisesti tilastotieteessä riippuvuutta tai löydöstä pidetään merkitseväenä, jos p-arvo on alle 0,05. Voimapalautelaitteen tarkkuudessa oli vain vähän hajontaa eri käyttäjien välillä, joka tarkoittaa että pääsääntöisesti kaikki osallistujat suoriutuivat tehtävästä tarkasti sen avulla.

VR-ohjaimen ja hiiren välillä erot eivät olleet niin selkeitä, eikä niiden välisessä tarkkuudessa ollut tilastollisesti merkittäviä löydöksiä (p-arvo 0,458). Molempien laitteiden kanssa hajonta oli huomattavasti suurempaa kuin voimapalautelaitteessa, eli osa käyttäjistä suoriutui tarkemmin kuin toiset. Etenkin hiiren kanssa vaikean tason merkkausegelmat huonontavat kokonaistarkkuutta merkittävästi. Osa osallistujista ”ampui” merkkausepisteen hiiren kanssa ohi halutusta paikasta, jolloin piste päätyi hyvin kauas kaikista alkuperäisistä pisteistä. Tämä näkyy tuloksissa yläpään hajonnassa, jolloin tarkkuus on ollut huonoa. Tämä on kuitenkin laitteista johtuva ominaisuus, eikä näitä tuloksia voida poistaa datasta. Se osoittaa, että hiiri ja 2D-näyttö ei ehkä sovellu 3D-objektin käsittelyyn ja merkkauseeseen täydellisesti, ja menetelmälle laskettu kokonaistarkkuus tietysti huononee jokaisesta virheestä. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että voimapalautteesta on tällaisessa tehtävässä merkittävä hyöty.



Kaavio 2. Kaikkien osallistujien keskimääräinen tarkkuus (eli alkuperäisten ja käyttäjän tekemien merkkipisteiden sijainnin erotus) laitekohtaisesti. Kaavioon on yhdistetty helppo ja vaikea taso.

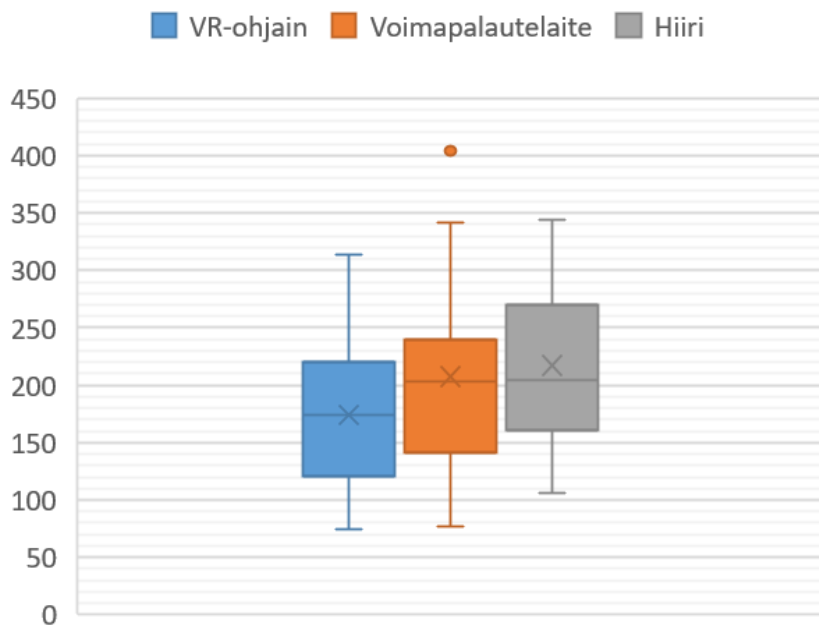
Tehtävien aikana tallennettiin myös aikaleimoja, joiden perusteella laskettiin mallin aktiiviseen kääntelyyn käytetty aika. VR-ohjaimen ja voimapalautelaitteen kohdalla tämä tarkoitti sitä aikaa, kun mallista ”pidettiin kiinni” ohjaimen avulla, eli sitä käännettiin, loitonnettiin tai lähennettiin ohjaimen avulla, ja hiiren kohdalla sitä aikaa, kun vasen hiiren näppäin pohjassa mallia käännettiin tai hiiren rullan avulla näkymää zoomattiin lähemmäs tai kauemmas mallista.

Helpoissa tasoissa sekä VR-ohjain että hiiri olivat nopeita. Tämä selittyy sillä, että VR-ohjainta on helppo käyttää, ja vapaa liikerata mahdollistaa nopean ja näppärän työskentelyn. Myös hiirellä kääntely sujui nopeasti, kun merkkauuspisteet löytyivät tässä kategoriassa nopeasti. Voimapalautelaitteella kääntelyyn kului helpossa kategoriassa eniten aikaa laitteen rajoitetusta liiketilasta ja ehkä myös käyttäjien kokemattomuudesta johtuen. Vaikeilla tasoilla nopeakäyttöisin on VR-ohjain, sillä sen avulla voidaan myös mennä objektin läpi, jolloin kääntelyssä ei ole mitään esteitä. Hiiren tilanne kuitenkin huonontui, kun merkkauuspisteiden paikat olivat vaikeita. Vaikeassa kategoriassa monesti mallin toiset osat saattoivat peittää merkkauuspisteen, jolloin käyttäjän täytyi löytää tietty tarkka katselukulma merkkauuspisteen löytämiseen. Hiiren ja 2D-näytön kanssa ei voinut myöskään zoomata mallin ”sisälle”, kuten VR-lasien avulla pystyi. Suurin piirtein samalla tasolla hiiren kanssa oli voimapalautelaite, jonka avulla

kääntely vei edelleen hieman enemmän aikaa joko harjoittelun puutteesta tai rajoitetusta työtilasta johtuen.

Keskimääräisiä kääntelyaikoja tutkiessa havaittiin, että VR-ohjaimella mallin käsittelyyn kului tilastollisesti merkittävästi vähemmän aikaa kuin hiirellä (p-arvo 0,013) tai voimapalautelaitteella (p-arvo 0,004). Tämä tarkoittaa, että VR-ohjain on kätevin käyttää, todennäköisesti koska käden liikerata on vapaa. VR-ohjaimen avulla käyttäjä sai mallin haluamaansa asentoon helpommin kuin muilla laitteilla. Hiiren ja voimapalautelaitteen välillä merkittävää eroa ei ollut (p-arvo 0,407), eli molemmat niistä olivat hitaampia syystä tai toisesta. Hiiri on monille tuttu käyttää, mutta ei ehkä sopinut tähän kolmiulotteisen objektin käsittelytehtävään kovin hyvin. Voimapalautelaite taas oli käytännössä kaikille käyttäjille uusi, ja sen käyttö vaati harjoittelua ja oli todennäköisesti hidasta hieman rajoitetun liikeradan ja uutuutensa vuoksi. Käyttäjien välisiä yksilöeroja oli silti runsaasti kaikkien laitteiden kanssa.

Kääntelyyn käytetty aika



Kaavio 3. Mallin aktiiviseen kääntelyyn käytetty aika sekunteina. Kaaviossa on yhdistetty helppo ja vaikea taso.

7.2 Subjektiiviset tulokset kyselylomakkeesta

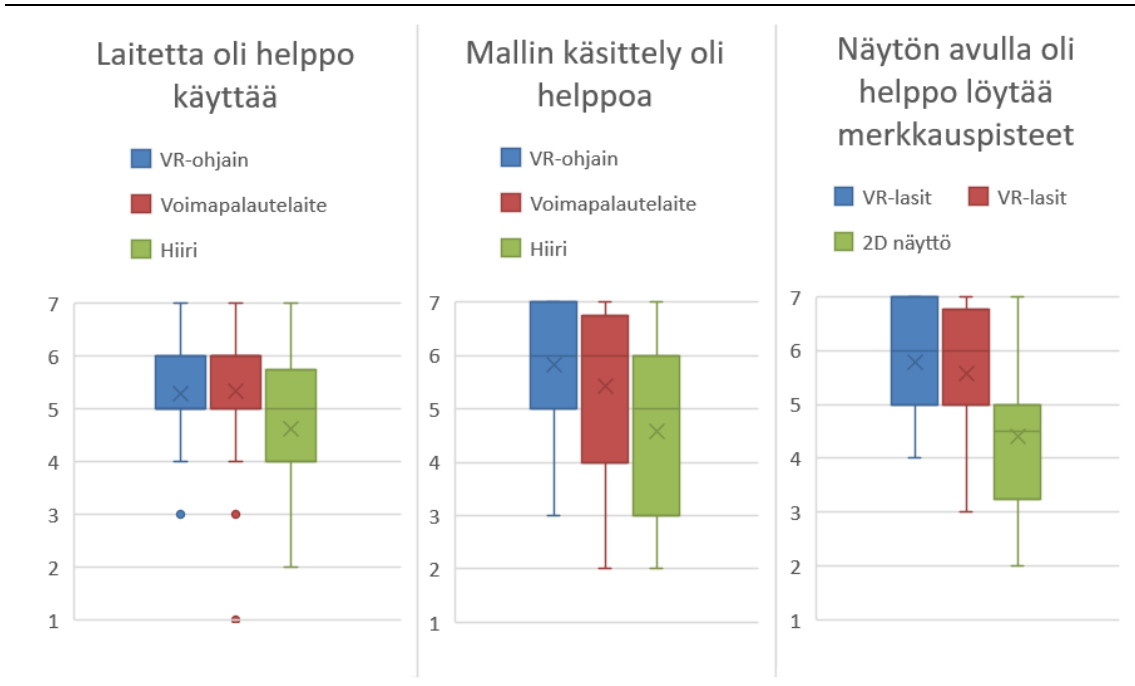
Kyselylomake koostui kolmesta samanlaisesta kysymysosiosta koskien jokaista käytettyä laiteyhdistelmää, sekä yhteenveto-osiota ja vapaista kommenteista. Tutkimukseen osallistujat täyttivät kyselylomakkeen laitekohtaiset kysymykset jokaisen testiosion jälkeen ja yhteenveto-osuuden koko testin lopuksi. Kyselylomakkeella selvitettiin käyttäjän kokemuksia ja mielipiteitä koskien jokaista laitetta. Vastauskaala oli numeroin 1-7, jossa 1 tarkoitti "vahvasti eri mieltä" ja 7 "vahvasti samaa mieltä". Käyttäjien annettiin halutessaan vaihtaa aiempaa vastausta testin myöhemmässä vaiheessa, koska useimmilla osallistujilla ei ollut aiempaa kokemusta laitteiden käytöstä, ja kokemuksia saattoi olla vaikea arvioida ennen kuin kaikki laitteet oli kokeiltu. Alkuperäiset vastaukset haluttiin silti kerätä heti kunkin laitteen käytön jälkeen, jotta kokemus oli vahvasti vielä muistissa.

Kaaviosta 4 voidaan nähdä, että kaikkia laitteita oli kohtalaisen helppo käyttää (mediaanipisteet 5, 6 ja 5) tässä kolmiulotteisen mallin käsittelytehtävässä, mutta keskiarvon perusteella silti sekä VR-ohjain että voimapalautelaite voittavat perinteisen hiiren. Kaaviossa vastausten palkin sisällä oleva x-merkki kuvaa vastausten keskiarvoa, ja (joskus huonosti erottuva palkin ylä- tai alarajan kohdalla ollessaan) poikkiviiva mediaanivastausta. Tilastollisesti nämä erot eivät olleet silti merkittäviä. Voimapalautelaite jakoi mielipiteitä vahvasti, ja skaala vaihtelikin täysin laidasta laitaan. Kaikille osallistujille annettiin jokaisen laitteen kanssa harjoittelu-aikaa, mutta osa ei tuntunut siltikään sisäistävän kolmiulotteista mutta rajoitettua käyttöperiaatetta täydellisesti. Suurin osa oppi laitteen käytön nopeasti, ja silloin siitä myös pidettiin todella paljon.

Kaaviossa 5 kuvataan mallin käsittelyn helppoutta, jossa parhaille pisteille pääsee VR-ohjain. VR-ohjaimella käsittely oli merkittävästi helpompaa kuin hiirellä (p-arvo 0,012), mutta hiiren ja voimapalautelaitteen ja voimapalautelaitteen ja VR-ohjaimen välillä merkittävää eroa ei ollut. Tässäkin kysymyksessä hajonta oli kaikkien laitteiden kohdalla suurta, mutta kaikkien mediaanipisteet olivat silti korkeat: 6, 6 ja 5.

Kolmas kysymys (kaavio 6) koski käytettyä näyttötyyppiä, eli 2D-näyttöä tai virtuaalitodellisuuslaseja. VR-lasit olivat selkeästi pidetyimmät merkkausepisteiden sijaintien löytämisessä kuin 2D-näyttö. Tämä ero oli myös tilastollisesti merkittävä (p-arvo <0,05 molemmissa tapauksissa verrattuna 2D-näyttöön). VR-lasit -palkkeja on siksi kaksi, koska sama kysymys esitettiin sekä VR-ohjaimen että voimapalautelaitteen yhteydessä. Pieni ero näiden palkkien välillä voi selittyä esimerkiksi silmien väsymyksellä testin loppua kohden, vaikka laitteiden

käyttöjärjestys olikin satunnaistettu. Ylipäättään VR-lasit koettiin kuitenkin paremmiksi kuin 2D-näyttö tässä tehtävässä.



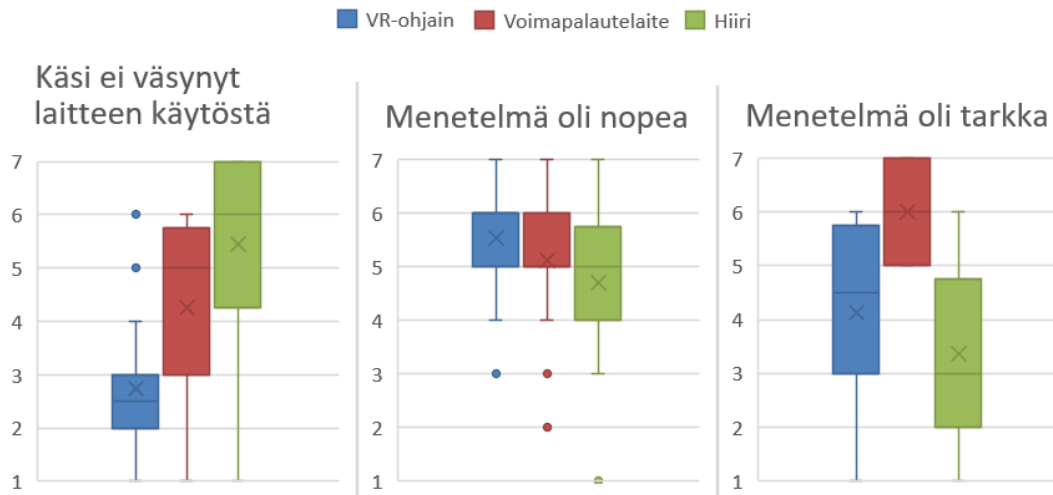
Kaaviot 4, 5 ja 6. Subjektiiiviset mielipiteet laitteiden käytön, mallien käsittelyn sekä merkkaukpisteiden löytämisen helppoudesta.

Kaaviossa 7 esitetään vastaukset kysymykseen ”käsi ei väsynyt laitteen käytöstä”. Vastaus 1 tarkoitti ”täysin eri mieltä” ja 7 ”täysin samaa mieltä”. Eniten kättä väsytti selvästi VR-ohjain, joka oli merkittävästi väsyttävämpi kuin voimapalautelaite, joka taas oli merkittävästi väsyttävämpi kuin hiiri. Vastaavasti hiiri oli kaikista vähiten kättä väsyttävä merkittäväällä erolla kumpaankin muuhun laitteeseen. Vastaukset ovat ymmärrettäviä, sillä VR-ohjainta käytettäessä osallistujat liikuttelivat koko kättä ilmassa, kun taas voimapalautelaitetta ja hiirtä käyttäessä kyynärpää ja käsivarsi oli tuettuna pöytää vasten. Voimapalautelaitteen käyttö vaati kuitenkin enemmän ranneliikkeitä kuin monelle normaalielämästä tuttu hiiri, joten myös tämä ero on luonnollisesti selitettävissä. Todennäköisesti lisäharjoittelu auttaisi käden väsymiseen sekä voimapalautelaitteen että VR-ohjaimen kohdalla, sillä ensikertaa niitä käyttävä voi jännittää kättä tarpeettoman paljon ja liikeradat tuntuvat alkuun oudoilta, jolloin käyttökokemus ei ole niin luonnollinen. Tätä ei kuitenkaan tämän tutkimuksen puitteissa selvitetty.

Seuraavassa kaaviossa 8 esitetään menetelmien koetut nopeudet. Tilastollisesti merkittävä eroavaisuus löydettiin ainoastaan (hitaaksi koetun) hiiren ja

(nopeaksi koetun) VR-ohjaimen väliltä. Kaikki menetelmät koettiin silti kohtalaisen nopeaksi, sillä kaikkien keskiarvot ovat yli 4,5.

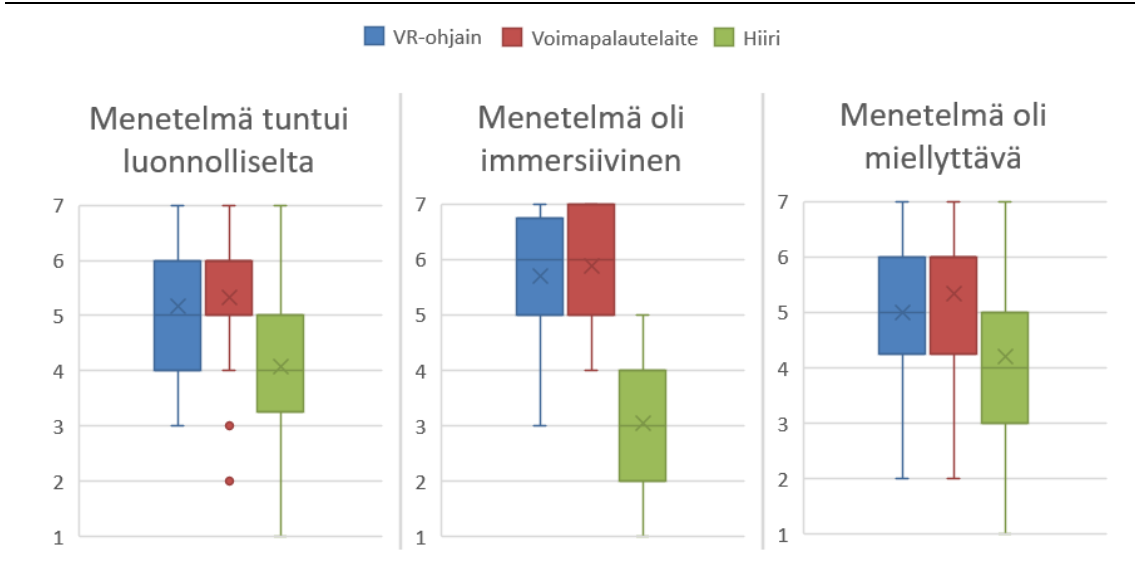
Menetelmän koettua tarkkuutta kuvataan kaaviossa 9. Voimapalautelaite on tässä ehdoton voittaja 6 pisteen keskiarvollansa. Se koettiin merkittävästi tarkemmaksi kuin kumpikaan muu laite (p-arvo kumpaankin tahansa verrattuna 0). Voimapalautelaite koettiin siis selvästi hyödylliseksi, ja mallin pinnan tunteminen lisäsi menetelmän koettua tarkkuutta paljon. Toinen vaikuttava tekijä voi olla voimapalautelaitteen kynämäinen muoto, joka itsessään tuntuu paremmin soveltuvan tarkkaan työskentelyyn kuin esimerkiksi kädessä kömpelömpi VR-ohjain. Näitä kahta esittävä ikoni virtuaalitodellisuudessa oli kuitenkin vastaava, joten uskon eron johtuvan mieluummin itse voimapalautteen ominaisuuksista.



Kaaviot 7, 8 ja 9. Subjektiiiset mielipiteet laitetta käyttävän käden väsymisestä, menetelmän nopeudesta sekä tarkkuudesta.

Kaavioissa 10, 11 ja 12 käsitellään menetelmien luonnollisuutta, immersiiivisyyttä sekä miellyttävyyttä. Yhteisenä tekijänä voidaan todeta, että hiiri koetaan jokaisessa kategoriassa huonoimmaksi näistä kolmesta. Tilastollisesti merkittävät erot hiiren ja kahden muun laitteen välillä löydettiin sekä luonnollisuudessa (p-arvot 0,014 ja 0,009) että immersiiivisyydessä (p-arvot 0 ja 0), mutta ei miellyttävyydessä (p-arvot > 0,05). Luonnollisuudessa kaikista korkeimmalle arvioitiin voimapalautelaite, jossa vastausten keskiluku eli tyypillisin arvo oli 6. VR-ohjaimella vastaava luku oli 5, ja hiirellä 4. Voimapalautelaite mahdollisti sekä kolmiulotteisen, joskin hieman rajoitetun liikkeen, mutta myös objektin pinnan tuntemisen. VR-ohjain vastaavasti alkoi ”pintakosketuksesta” tärisemään, mutta tämä ei ole yhtä luontainen ilmoitustapa kuin voimapalautelaite, ja käyttäjä pys-

tyi värinästä huolimatta liikkumaan ohjaimella myös objektin sisällä. Hiirellä työskennellessä käyttäjällä ei ollut mahdollisuutta edes liikkua kolmiulotteisesti, saati saada palautetta objektiin koskemisesta.



Kaaviot 10, 11 ja 12. Subjektiiiset mielipiteet menetelmän luonnollisuudesta, immersiiivisyydestä sekä miellyttävyydestä.

Viimeisenä osiossa osallistujaa pyydettiin valitsemaan se laite tai tasapelitalanteessa ne laitteet, jotka hänen mielestään sopivat tähän tehtävään kokonaisuudessaan parhaiten. Ääniä sai siis antaa enemmänkin kuin yhden, ja yhteensä niitä annettiin 30 (24 osallistujaa). Näistä 30 äänestä hiiri sai 16,7% (5 ääntä), VR-ohjain 20% (6 ääntä), ja voimapalautelaite selvän enemmistön 63,3% (19 ääntä).

Kokonaisuudessaan subjektiiviset tulokset tukevat hyvin objektiivisia löydöksiä. Tärkeimpänä yhteenvetona mainittakoon se, että VR-ohjain koetaan nopeimmaksi ja helppokäyttöiseksi käsittelyvälineeksi (vaikka väsyttääkin käden), ja voimapalautelaite taas tarkimmaksi ja luonnollisimmaksi näistä kolmesta, koska käyttäjä pystyi tuntemaan objektin pinnan ja tukeutumaan siihen.

7.3 Yhteenveto tutkimuksen tuloksista

Tulosten perusteella voimapalautelaite vaikuttaa lupaavalta tarkkuutta vaati-
viin luonteeltaan kolmiulotteisiin tehtäviin. Sen käyttö vaatii kuitenkin huomattavasti enemmän harjoittelua kuin VR-ohjaimen saati hiiren käyttö, mutta toisaalta se antaa käyttäjälle palautteena korvaamatonta tietoa objektien pinnoista. Objektien kääntelyn haastavuus tulee kuitenkin ottaa huomioon ennen esimerkiksi voimapalautelaitteen käyttämistä rutiinitehtävissä, ja myös käden väsyminen jo lyhyen työskentelyjakson jälkeen on hyvin todennäköistä. Kehitystä kaivataan siis laitteen fyysisten ominaisuuksien parantamiseksi.

VR-ohjain taas on hyvin nopea ja helppo käyttää, mutta ei kovin tarkka. Se sopiikin paremmin pelikäyttöön, tai sellaisiin tehtäviin joissa ei painoteta tarkkuutta vaan esimerkiksi ainoastaan kolmiulotteista liikettä. Kaikille tuttu tietokoneen hiiri taas sopi tämä tutkimuksen mukaan kolmiulotteiseen tehtävään melko huonosti, sillä sen kanssa käyttäjillä oli ongelmia sekä tarkkuudessa että nopeudessa. Hiiri on huomattavasti halvempi vaihtoehto kuin kaksi muuta, mutta tehtävän luonteesta riippuen kannattaa miettiä, onko se kuitenkin aina paras ratkaisu. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan puoltaa tarvetta uusille immersiiivisille kolmiulotteisille sovelluksille esimerkiksi juuri radiologian alalle, sillä hiiri ei näytä olevan paras menetelmä kolmiulotteisen datan käsittelemiseen. Päätökset sovellusten uusimisesta tulee kuitenkin tehdä tapauskohtaisesti, ja radiologian alalla vastaväitteenä voidaan pitää esimerkiksi sitä, että kokeneemmat lääkärit ovat harjoittelun kautta saavuttaneet hyvän taitotason kolmiulotteisen datan käsittelyyn myös hiiren ja 2D-näytön avulla.

8 Lopuksi

Tässä tutkielmassa perehdyin haptiseen palautteeseen ja virtuaalitodellisuuteen, esittelin haptista palautetta ja katseohjausta hyödyntävän virtuaalitodellisuussovelluksen, jonka kehitin yhteistyössä toisen tutkijan kanssa, sekä vertailin voimapalautetta ja värinäpalautetta tuottavia laitteita normaaliin hiireen kolmiulotteisen objektin merkkaustehtävässä. Lukija saa tästä tutkielmasta hyvän käsityksen haptisen palautteen ja virtuaalitodellisuuden yhdistämisestä, sekä mitä mahdollisuuksia tällaisilla sovelluksilla on etenkin lääketieteen alalla.

Tutkimuksessa havaittiin, että käyttäjä hyötyy voimapalautteesta ja pystyy sen avulla tekemään merkkaukset erittäin tarkasti, mutta sen käyttö voi väsyttää käyttäjän käden nopeasti, ja saattaa vaatia enemmän harjoittelua. Värinäpalautetta tuottava virtuaalitodellisuusohjain taas oli helppokäyttöinen, ja objektin käsittely sen avulla sujuvaa. Ohjaimen kanssa oli kuitenkin ongelmia tarkkuudessa, mikä johtui siitä, ettei käyttäjällä ollut mitään tukea kädelle sen käytön aikana. Tämän tutkimuksen mukaan hiiri ei sopinut kolmiulotteisten objektien käsittelyyn kovin hyvin, sillä merkkauksien tarkkuudessa oli paljon parantamisen varaa, eikä objektien käsittelykään ollut nopeaa.

Vaikka tässä tutkimuksessa voimapalautelaitteen käytöstä saatiin hyötyjä, täytyy oikeassa elämässä laitteiden valinnassa pohtia sekä sen hyödyllisyyttä että hintaa itse sovellukseen nähden. Haptinen laite ei yleensä myöskään voi suoraan korvata hiirtä, vaan koko järjestelmä täytyy kehittää joko uudelleen tai muokata kolmiulotteista laitetta tukevaksi.

Yleistyäkseen haptiset laitteet, mutta etenkin voimapalautelaitteet, vaativat vielä kehitystä, ja niiden hintojen pitäisi halventua. Tutkimuksessa käytetyssä laitteessa ongelmana oli työtilan pienuus ja laitteen käsivarren rajoitettu liike, mutta monet suuret yhtiöt sijoittavat virtuaalitodellisuuteen, joten ehkä sitä kautta myös virtuaalitodellisuuteen sopivia haptisia laitteita kehitetään ja parannetaan entistä enemmän. Parhaassa tapauksessa haptisen laitteen käyttö ja sen tuottama palaute tuntuu luonnolliselta, eikä se rajoita käyttäjän liikkeitä tai väsytä käyttäjää.

Tulevaisuudessa tässä työssä esiteltyä tutkimusta voisi jatkaa moneen suuntaan. Vertailuun voisi ottaa lisää erilaisia laitteita, esimerkiksi 3D-hiiren tai voimapalautetta tuottavat hanskat. Myös kahden voimapalautelaitteen yhtäaikainen käyttö merkkaustehtävässä olisi mielenkiintoinen tutkimuksen aihe. Jos taas tutkimukseen kutsuttaisiin radiologian alan lääkäreitä, voitaisiin myös tutkimustehtävät laatia enemmän todellisuutta vastaaviksi. Tällöin merkkaukspisteet olisi mahdollista sijoittaa sellaisille paikoille, joita todellisessa leikkaus-

suunnittelussakin käytetään. Voi olla, että lääkärit myös saisivat tällaisessa tutkimuksessa tarkempia tuloksia, sillä heidän kädet ja liikkeet voivat olla harjoittelusta johtuen vakaammat, ja he suhtautuisivat kokeeseen todennäköisesti tavallista minkä tahansa alan yliopisto-opiskelijaa vakavammin.

Haptinen palaute virtuaalitodellisuudessa on yksi todella lupaava alue tulevaisuudessa, mutta kuten tutkimuksenkin loppupäätelmänä voidaan todeta, tarjoavat jo nykyiset haptiset laitteet tällä hetkellä mielenkiintoisia ja ainutlaatuisia tapoja 3D-objektien käsittelyyn ja manipulointiin. Visuaaliseen palautteeseen pohjautuvat virtuaalitodellisuuslaitteet ovat tällä hetkellä paljon kehittyneempiä sekä halvempia kuin haptista palautetta tuottavat laitteet, mutta jo nyt nämä yhdistämällä on mahdollista luoda aivan uudenkaltaisia simulaatioita ja sovelluksia. Tämän työn tutkimuksen ja kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan sanoa, että tuntoaistin hyödyntämisestä on ”uutuudenviehätyksen” lisäksi konkreettisia hyötyjäkin.

9 Viiteluettelo

- [3D Systems, Inc. 2019a] 3D Systems, Inc. 2019a. Phantom Premium Haptic Devices. Saatavilla elektronisesti: <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium> (haettu 9.2.2019).
- [3D Systems, Inc. 2019b] 3D Systems, Inc. 2019b. Touch X. Saatavilla elektronisesti: <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch-x> (haettu 10.1.2019).
- [Alaraj *et al.* 2015] Ali Alaraj, Cristian J. Luciano, Daniel P. Bailey, Abdussalam Elsenousi, Ben Z. Roitberg, Antonio Bernardo, P. Pat Banerjee & Fady T. Charbel. 2015. Virtual Reality Cerebral Aneurysm Clipping Simulation With Real-Time Haptic Feedback. *Neurosurgery*, 1. doi:10.1227/neu.0000000000000583
- [Blausen.com Staff 2014] Blausen.com Staff. 2014. WikiJournal of Medicine: Medical gallery of Blausen Medical 2014. Saatavilla elektronisesti: https://en.wikiversity.org/wiki/WikiJournal_of_Medicine/Medical_gallery_of_Blausen_Medical_2014 (haettu 9.1.2019).
- [Botella *et al.* 2017] Cristina Botella, Javier Fernández-Álvarez, Verónica Guillén, Azucena García-Palacios & Rosa Baños. 2017. Recent progress in virtual reality exposure therapy for phobias: A systematic review. *Current Psychiatry Reports*, 19(7), <https://doi.org/10.1007/s11920-017-0788-4>
- [Bowman *et al.* 2001] Doug A. Bowman, Ernst Kruijff, Joseph J. LaViola, Jr. & Ivan Poupyrev. 2001. An Introduction to 3-D User Interface Design. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(1), 96–108. doi:10.1162/105474601750182342
- [Burdea 1999] Grigore C. Burdea. 1999. Haptic feedback for virtual reality. *Virtual Reality and Prototyping Workshop*. Vol. 2.
- [Burdea *et al.* 1996] Grigore C. Burdea, Paul Richard & Philippe Coiffet. 1996. Multimodal virtual reality: Input-output devices, system integration, and human factors. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 8(1), 5–24. doi:10.1080/10447319609526138
- [Carpenter *et al.* 2018] Cody W. Carpenter, Charles Dhong, Nicholas B. Root, Daniel Rodriguez, Emily E. Abdo, Kyle Skelil, Mohammad A. Alkhadra, Julian Ramirez, Vilayanur S. Ramachandran & Darren J. Lipomi. 2018. Human ability to discriminate surface chemistry by touch. *Materials Horizons*, 5(1), 70–77. doi:10.1039/c7mh00800g

- [Carvalho 2016] Cristiano Ramos Carvalho. 2016. *Direct Haptics in MASSIVE's Virtual Reality experiences*. Ph. D. Dissertation, Faculty of Engineering, University of Porto.
- [Cipresso et al. 2018] Pietro Cipresso, Irene Alice Chicchi Giglioli, Mariano Alcañiz Raya & Giuseppe Riva. 2018. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*, 9. doi:10.3389/fpsyg.2018.02086
- [Craig et al. 2009] Alan Craig, William R. Sherman & Jeffrey D. Will. 2009. *Developing Virtual Reality Applications: Foundations of Effective Design*. Morgan Kaufmann.
- [Cruz-Neira 1993] Carolina Cruz-Neira. 1993. *Virtual reality overview*. SIGGRAPH 93 Course Notes 21st International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Orange County Convention Center, Orlando, FL.
- [Cummings 2007] Alastair H. Cummings. 2007. The Evolution of Game Controllers and Control Schemes and Their Effect on Their Games. In *Proceedings of the 17th Annual University of Southampton Multimedia Systems Conference*, Vol. 21.
- [Fitbit, Inc. 2019] Fitbit, Inc. 2019. Fitbit Charge 3. Saatavilla elektronisesti: <https://www.fitbit.com/fi/charge3> (haettu 9.2.2019).
- [Frausto-Robledo 2018] Anthony Frausto-Robledo. 2018. Infographic—The Future of VR (virtual reality) by 2025. Saatavilla elektronisesti: <https://architosh.com/2018/06/infographic-the-future-of-vr-virtual-reality-by-2025/> (haettu 18.2.2019).
- [Frittschi et al. 2008] Michael Frittschi, Hasan Esen, Martin Buss & Marc O. Ernst. 2008. Multi-modal VR systems. *The Sense of Touch and Its Rendering* (pp. 179-206). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Gescheider et al. 1994] G.A. Gescheider, S.J. Bolanowski, K.L Hall, K.E. Hoffman & R.T. Verrillo. 1994. The Effects of Aging on Information-Processing Channels in the Sense of Touch: I. Absolute Sensitivity. *Somatosensory & Motor Research*, 11(4), 345–357. doi:10.3109/08990229409028878
- [Gigantti 2018a] Gigantti. 2018a. Oculus Rift VR + Oculus Touch pakkaus. Saatavilla elektronisesti: <https://www.gigantti.fi/product/gaming/vr-pelaaminen/OCULUSBUNDLE/oculus-rift-vr-oculus-touch-pakkaus> (haettu 23.10.2018).

- [Gigantti 2018b] Gigantti. 2018b. HTC Vive VR -lasit (musta). Saatavilla elektronisesti: <https://www.gigantti.fi/product/gaming/vr-pelaaminen/HTCVIVE/htc-vive-vr-lasit-musta> (haettu 23.10.2018).
- [Goldstein 2010] E. Bruce Goldstein. 2010. *Sensation and Perception*. Eight edition. Cengage Learning.
- [Google 2018] Google. 2018. Google Cardboard. Saatavilla elektronisesti: <https://vr.google.com/intl/fi-fi/cardboard/> (haettu 23.10.2018).
- [Grand View Research, Inc. 2017] Grand View Research, Inc. 2017. Augmented Reality (AR) & Virtual Reality (VR) in Healthcare Market Analysis By Component (Hardware, Software, and Service), By Technology (Augmented Reality, Virtual Reality), And Segment Forecasts, 2018 – 2025. Saatavilla elektronisesti: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/virtual-reality-vr-in-healthcare-market> (haettu 18.2.2019).
- [HapticsHouse.com 2019] HapticsHouse.com. 2019. What is Haptics? Saatavilla elektronisesti: <https://haptichouse.com/pages/what-is-haptics> (haettu 20.2.2019).
- [HaptX Inc. 2018] HaptX Inc. 2018. HaptX Gloves. Saatavilla elektronisesti: <https://haptx.com/> (haettu 9.2.2019).
- [Haug *et al.* 1994] Egil Haug, Olav Sand & Öysten V. Sjaastad. 1994. *Ihmisen fysiologia*. WSOY.
- [Hayward *et al.* 2004] Vincent Hayward, Oliver R. Astley, Manuel Cruz-Hernandez, Danny Grant & Gabriel Robles-De-La-Torre. 2004. Haptic Interfaces and Devices. *Sensor Rev.*, vol. 24, no. 1, pp. 16-29.
- [Hinckley *et al.* 2014] Ken Hinckley, Robert J. K. Jacob, Colin Ware, Jacob O. Wobbrock & Daniel Wigdor. 2014. Input/Output Devices and Interaction Techniques. *CRC Computer Science and Engineering Handbook*, CRC Press.
- [HTC Corporation 2016] HTC Corporation. 2016. Vive PRE User Guide. Saatavilla elektronisesti: https://www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/Vive_PRE_User_Guide.pdf (haettu 3.10.2018).
- [HTC Corporation 2018] HTC Corporation. 2018. VIVE Virtual Reality System. Saatavilla elektronisesti: <https://www.vive.com/us/product/vive-virtual-reality-system/> (haettu 19.9.2018).
- [Huawei Technologies Co., Ltd. 2019] Huawei Technologies Co., Ltd. 2019. HUAWEI Mate 20 Pro. Saatavilla elektronisesti: <https://consumer.huawei.com/fi/phones/mate20-pro/> (haettu 9.2.2019).
- [IDC 2017] IDC. 2017. Worldwide Spending on Augmented and Virtual Reality Expected to Double or More Every Year Through 2021, According to IDC. Saatavilla elektronisesti:

- <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS42959717> (haettu 9.11.2018).
- [Johnson 2001] Kenneth O. Johnson. 2001. The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Current Opinion in Neurobiology*, 11(4), 455–461. doi:10.1016/s0959-4388(00)00234-8
- [Johnston *et al.* 2017] Angus P.R. Johnston, James Rae, Nicholas Ariotti, Benjamin Bailey, Andrew Lilja, Robyn Webb, Charles Ferguson, Sheryl Maher, Thomas P. Davis, Richard I. Webb, John McGhee & Robert G. Parton. 2017. Journey to the centre of the cell: Virtual reality immersion into scientific data. *Traffic*. Volume 19: 105–110. <https://doi.org/10.1111/tra.12538>
- [Kaiser *et al.* 2003] Ed Kaiser, Alex Olwal, David McGee, Hrvoje Benko, Andrea Corradini, Xiaoguang Li, Phil Cohen & Steven Feiner. 2003. Mutual disambiguation of 3D multimodal interaction in augmented and virtual reality. *Proceedings of the 5th International Conference on Multimodal Interfaces - ICMI '03*. doi:10.1145/958432.958438
- [Kang *et al.* 2014] Olivia E. Kang, Katherine E. Huffer & Thalia P. Wheatley. 2014. Pupil Dilation Dynamics Track Attention to High-Level Information. *PLoS ONE*, 9(8), e102463. doi:10.1371/journal.pone.0102463
- [Kelion 2015] Leo Kelion. 2015. HTC reveals virtual reality headset with Valve at MWC. Saatavilla elektronisesti: <https://www.bbc.com/news/technology-31664948> (haettu 24.10.2018).
- [Kennedy *et al.* 1993] Robert S. Kennedy, Norman E Lane, Kevin S. Berbaum & Michael G. Lilienthal. 1993. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220. doi:10.1207/s15327108ijap0303_3
- [Kok & van Liere 2007] Arjan J.F. Kok & Robert van Liere. 2007. A multimodal virtual reality interface for 3D interaction with VTK. *Knowledge and Information Systems*, 13(2), 197–219. doi:10.1007/s10115-007-0066-6
- [Kuber *et al.* 2007] Ravi Kuber, Wai Yu & Graham McAllister. 2007. Towards Developing Assistive Haptic Feedback for Visually Impaired Internet Users. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1525–1534. ACM. doi:10.1145/1240624.1240854.
- [MacLean 2000] Karon E. MacLean. 2000. Designing with Haptic Feedback. *Proc.ICRA*.
- [McMahan 2003] Alison McMahan. 2003. Immersion, Engagement, and Presence: A Method for Analyzing 3-D Video Games. In M. J. P. Wolf & B.

- Perron (eds.), *The Video Game Theory Reader*. New York: Routledge, pp.67-86.
- [Medellín-Castillo *et al.* 2016] H.I. Medellín-Castillo, E.H. Govea-Valladares, C.N. Pérez-Guerrero, J. Gil-Valladares, Theodore Lim & James M. Ritchie. 2016. The evaluation of a novel haptic-enabled virtual reality approach for computer-aided cephalometry. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 130, 46–53. doi:10.1016/j.cmpb.2016.03.014
- [Microsoft Corporation 2019] Microsoft Corporation. 2019. Wingman Force Feedback Mouse. Saatavilla elektronisesti: <https://www.microsoft.com/buxtoncollection/detail.aspx?id=130> (haettu 9.2.2019).
- [Miller & Zeleznik 1998] Timothy Miller & Robert Zeleznik. 1998. An Insidious Haptic Invasion: Adding Force Feedback to the X Desktop. *Proc. ACM User Interface Software and Technologies (UIST) 98*, ACM Press, New York, pp. 59-64.
- [Møller 2003] Aage R. Møller. 2003. *Sensory Systems : Anatomy, Physiology and Pathophysiology*. Academic Press.
- [Nafarrete 2016] Jonathan Nafarrete. 2016. Weekend Downloads: New Content for Samsung Gear VR. Saatavilla elektronisesti: <https://vrscout.com/news/weekend-downloads-new-content-samsung-gear-vr/> (haettu 24.10.2018).
- [Oakley *et al.* 2000] Ian Oakley, Marilyn Rose McGee, Stephen Brewster & Philip Gray. 2000. Putting the feel in 'look and feel'. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '00*. doi:10.1145/332040.332467
- [Pensieri & Pennacchini 2014] Claudio Pensieri & Maddalena Pennacchini. 2014. Overview: Virtual Reality in Medicine. *J Virtual Worlds* Vol 7:1–34.
- [Persistence Market Research 2018] Persistence Market Research. 2018. Healthcare AR VR Market: Healthcare Industry to Witness Exponential Growth in Adoption Despite High Prices of AR VR Devices: Global Industry Analysis 2013 - 2017 and Forecast 2018 – 2026. Saatavilla elektronisesti: <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/healthcare-ar-vr-market.asp> (haettu 19.2.2019).
- [Poyade *et al.* 2014] Matthieu Poyade, Michael Kargas & Victor Portela. 2014. Haptic Plug-in for Unity. Digital Design Studio (DDS), Glasgow School of Art, Glasgow, United Kingdom. Saatavilla elektronisesti: http://radar.gsa.ac.uk/3575/6/Haptics_Plug_READ_ME.pdf (haettu 21.10.2018).

- [Pänkäläinen 2016] Tero Pänkäläinen. 2016. Miten Google Cardboard eroaa paremmista virtuaalilaseista? Saatavilla elektronisesti: <https://www.virtuaalimaailma.fi/google-cardboard-suomi/> (haettu 23.10.2018).
- [Pänkäläinen 2017a] Tero Pänkäläinen. 2017a. Kuinka 150€ Samsung Gear VR -virtuaalilasit eroavat kalliimmista VR-laseista? Saatavilla elektronisesti: <https://www.virtuaalimaailma.fi/samsung-gear-vr-hinta/> (haettu 24.10.2018).
- [Pänkäläinen 2017b] Tero Pänkäläinen. 2017b. 360-kamera videokuvaukseen – mikä on paras vaihtoehto? Saatavilla elektronisesti: <https://www.virtuaalimaailma.fi/360-kamera/> (haettu 17.2.2019).
- [Raisamo & Rinta-Kiikka 2018] Roope Raisamo & Irina Rinta-Kiikka. 2018. Co-creation-rahoituksen projektisuunnitelma. Digital and Physical Immersion in Radiology and Surgery. Saatavilla elektronisesti: <http://ideascout.fi/content/uploads/2018/07/Co-Creation-suunnitelma-v2.pdf> (haettu 19.10.2018).
- [Riva 2005] Giuseppe Riva. 2005. Virtual Reality in Psychotherapy: Review. *CyberPsychology & Behavior*, 8(3), 220–230. doi:10.1089/cpb.2005.8.220
- [Robles-De-La-Torre 2006] Gabriel Robles-De-La-Torre. 2006. The Importance of the Sense of Touch in Virtual and Real Environments. *IEEE Multimedia*, 13(3), 24–30. doi:10.1109/mmul.2006.69
- [Rorke et al. 1998] Michael Rorke, Shaun Bangay & Peter Wentworth. 1998. Virtual reality interaction techniques. *Proceedings of the 1st Annual South African Telecommunication, Networks and Application Conference (SATNAC)*.
- [Saad et al. 2018] Elie Saad, W. Robert J. Funnell, Paul G. Kry & Nicole M. Ventura. 2018. A Virtual-Reality System for Interacting with Three-Dimensional Models Using a Haptic Device and a Head-Mounted Display. *2018 IEEE Life Sciences Conference (LSC)*(pp. 191-194).
- [Samsung 2018] Samsung. 2018. Gear VR Controller. Saatavilla elektronisesti: <https://www.samsung.com/uk/mobile-accessories/gear-vr-controller/> (haettu 24.10.2018).
- [Schou 2012] Danni Schou. 2012. MeshSplitting. Saatavilla elektronisesti: <https://github.com/DanniSchou/MeshSplitting> (haettu 24.10.2018).
- [Simpson 2018] Dan Simpson. 2018. The Ultimate Extended Reality (XR) Glossary. Saatavilla elektronisesti: <https://www.tvrlp.com/ultimate-extended-reality-glossary/> (haettu 9.10.2018).

- [Slater & Sanchez-Vives 2016] Mel Slater & Maria V. Sanchez-Vives. 2016. Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 3. doi:10.3389/frobt.2016.00074
- [Smith 2015] Jordan W. Smith. 2015. Immersive virtual environment technology to supplement environmental perception, preference and behavior research: a review with applications. *International journal of environmental research and public health*, 12(9), 11486-11505.
- [Sony Interactive Entertainment Europe Limited 2019] Sony Interactive Entertainment Europe Limited. 2019. Langaton DUALSHOCK 4-ohjain. Saatavilla elektronisesti: <https://www.playstation.com/fin/en/exlore/accessories/dualshock-4-wireless-controller/> (haettu 9.2.2019).
- [Srinivasan & Basdogan 1997] Mandayam A. Srinivasan & Cagatay Basdogan. 1997. Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges. *Comput. Graph.* 21, 4, 393–404.
- [Stevens & Patterson 1995] Joseph C. Stevens & Matthew Q. Patterson. 1995. Dimensions of Spatial Acuity in the Touch Sense: Changes over the Life Span. *Somatosensory & Motor Research*, 12(1), 29–47. doi:10.3109/08990229509063140
- [Sutherland 1965] Ivan Sutherland. 1965. The Ultimate Display. Multimedia: From Wagner to Virtual Reality. *Proceedings of IFIP Congress*, pp. 506-508.
- [Sutherland et al. 2018] Justin Sutherland, Jason Belec, Adnan Sheikh, Leonid Chepelev, Waleed Althobaity, Benjamin J.W. Chow, Dimitrios Mitsouras, Andy Christensen, Frank J. Rybicki & Daniel J. La Russa. 2018. Applying Modern Virtual and Augmented Reality Technologies to Medical Images and Models. *Journal of Digital Imaging*. pp 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10278-018-0122-7>
- [Tactai, Inc. 2018] Tactai, Inc. 2018. Landry, S. What are input and output in virtual reality? Saatavilla elektronisesti: <http://www.tactai.com/index.php/k2/blog-page/item/31-input-output-in-vr> (haettu 24.2.2019).
- [Tan et al. 1994] Hong Z. Tan, Mandayam A. Srinivasan, Brian Eberman & Belinda Cheng. 1994. Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces. *Dynamic Systems and Control*, 55(1), 353-359.
- [Teslasuit 2018] Teslasuit. 2018. Teslasuit. Saatavilla elektronisesti: <https://teslasuit.io/teslasuit> (haettu 9.2.2019).
- [Thrustmaster 2019] Thrustmaster. 2019. TX Racing Wheel Leather Edition. Saatavilla elektronisesti: <http://www.thrustmaster.com/> (haettu 9.2.2019).

- [Tobii AB 2018] Tobii AB. 2018. Tobii Pro VR Integration. Saatavilla elektronisesti: <https://www.tobii.com/product-listing/vr-integration/> (haettu 19.9.2018).
- [Unity Technologies 2018a] Unity Technologies. 2018a. The world's leading real-time creation platform. Saatavilla elektronisesti: <https://unity3d.com/unity> (haettu 28.9.2018).
- [Unity Technologies 2018b] Unity Technologies. 2018b. Learning the interface. Saatavilla elektronisesti: <https://docs.unity3d.com/Manual/LearningtheInterface.html> (haettu 18.10.2018).
- [Unity Technologies 2018c] Unity Technologies. 2018c. Using the Asset Store. Saatavilla elektronisesti: <https://docs.unity3d.com/Manual/AssetStore.html> (haettu 18.10.2018).
- [Vallbo & Johansson 1984] Å. B. Vallbo & R. S. Johansson. 1984. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Hum. Neurobiol.* 3, 3–14.
- [Van der Meijden & Schijven 2009] O. A. J. van der Meijden & M. P. Schijven. 2009. The value of haptic feedback in conventional and robot-assisted minimal invasive surgery and virtual reality training: a current review. *Surg Endosc.* 23:1180–90.
- [Van Krevelen & Poelman 2010] Rick Van Krevelen & Ronald Poelman. 2010. A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *The International Journal of Virtual Reality*, 9(2):1-20.
- [Vatanen 2016] Panu Vatanen. 2016. Tästä virtuaalitodellisuudessa on kyse – kymmenen kysymystä virtuaalilaseihin ja keinotodellisuuteen liittyen. Yle. Saatavilla elektronisesti: <https://yle.fi/uutiset/3-9072959> (haettu 25.10.2018).
- [Vidholm 2008] Erik Vidholm. 2008. *Visualization and haptics for interactive medical image analysis*. Ph. D. Dissertation, Faculty of Science and Technology, Uppsala University.
- [Visualise Creative Ltd. 2019] Visualise Creative Ltd. 2019. Virtual Reality in Healthcare. Saatavilla elektronisesti: <https://visualise.com/virtual-reality/virtual-reality-healthcare> (haettu 18.2.2019).
- [Våpenstad *et al.* 2013] Cecilie Våpenstad, Erlend Fagertun Hofstad, Thomas Langø, Ronald Mårvik & Magdalena Karolina Chmarra. 2013. Perceiving haptic feedback in virtual reality simulators. *Surg Endosc* 27:2391–2397.
- [Widmaier *et al.* 2004] Eric P. Widmaier, Raff Hershel & Kevin T. Strang. 2004. *Vander, Sherman & Luciano's Human Physiology: The Mechanisms of Body Function*. 9th Ed., McGraw-Hill Education.